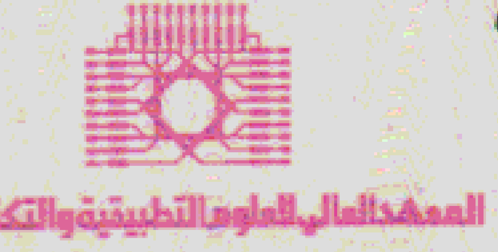



# الأوتار الفائقة

## نظرية كل شيء؟

إعداد
پول ديفيس جوليان براون

ترجمة
د. أدهم السمان






رَيـــع الـــدار

لهيئة مدارس أبناء وبنات الشهداء في الجمهورية العربية السورية

**الطبعة الثانية**

---

**١٩٩٧**



دمشق أوتوستراد المزة ص. ب: ١٦٠٣٥ ـ برقياً طلاسدار

---

هاتف: ٦٦١٨٩٦١ـ٦٦١٨٠١٣ تلفاكس: ٦٦١٨٨٢٠


الأوتار الفائقة
نظرية كل شيء؟

عنوان الكتاب باللغة الإنكليزية

# Superstrings

*A Theory of Everything?*



الطبعة الأولى ١٩٩٣

إعداد
پول ديفيس جوليان براون

# الأوتار الفائقة

## نظرية كل شيء ؟

ترجمة
د . أدهم السمان

الأوتار الفائقة نظرية كل شيء/ [ بول ديفيس، جوليان براون ]. ـــ دمشق: دار طلاس، ١٩٩٢. ـــ ٢٠١ص؛ ٢٤ سم.

بيان التأليف من المقدمة.

١ ـــ ١ر٥٣٠ دي ف أ ٢ ـــ العنوان ٣ ـــ ديفيس ٤ ـــ براون

**مكتبة الأسد**

رقم الإيداع ـــ ١٩٩٢/١١/١٣٧٦ رقم الإصدار ٥٩٤

# قبـل البـدايـة

ظهرت في السنوات القليلة الأخيرة نظرية جديدة جذبت اهتمام الفيزيائيين؛ وقد عُرفت، في بادئ الأمر، باسم نظرية الأوتار، ثم تطورت فأصبح اسمها: نظرية الأوتار الفائقة Superstring theory. إنها نظرية واعدة تمهد لتوحيد قوى الطبيعة وجسيمات المادة الأساسية والمكان والزمان — أو، بمختصر القول، نظرية واحدة لكل الأشياء. ولئن كان مضمون هذه النظرية، الذي يوحي بأن كل شيء في الوجود مصنوع من أوتار صغيرة فحسب، يبدو غير معقول إلا أنها مبنية على أفكار رياضية أنيقة ذات نتائج أثبتت جدارة مشجعة باتفاقها مع عالم الواقع.

لقد كان من شأن هذه النظرية الوترية أن أصبحت الآن واحدة من أكثر الفروع حيوية في بحوث الفيزياء النظرية، وأن جذبت اهتمام عدة نظريين لامعين. ومن رجال العلم نفر أبدوا حماساً كبيراً لتطلعات هذه النظرية وأصدروا نبوءات جريئة بخصوص إمكانية نجاحها. ومع ذلك تعرضت هذه النظرية لبعض الانتقادات كما سترون في أثناء قراءة هذا الكتاب.

لقد قررنا، عام ١٩٨٧، إجراء مسح لحالة البحوث في نظرية الأوتار الفائقة، وذلك في برنامج أعددناه حول هذا الموضوع للإذاعة البريطانية. وقد أُذيع في مستهل عام ١٩٨٨. ولأجل ذلك ذهبنا نجري مقابلات مع أنصار هذه النظرية ومع منتقديها، نطلب فيها إيضاحاتهم وآرائهم. وكما فعلنا في عملنا المشترك السابق، الشبح في الذرة The Ghost in the Atom (دار نشر جامعة كمبردج، ١٩٨٦)، الذي كان منطلقاً لبرنامج إذاعي قبل أن يصبح كتاباً، شعرنا أن من الخير نشر هذه الأحاديث بشكل أكثر كمالاً واستمراراً.

فالتزمنا النصوص الأصلية ما استطعنا؛ لكن لم يكن بد من إجراء بعض التغيير الذي يتطلبه النص المطبوع. بيد أننا سعينا مع ذلك إلى الاحتفاظ بسمتها الحوارية.

يهدف هذا الكتاب إلى إعطاء الفيزيائيين وسواهم، من المهتمين غير الفيزيائيين، نظرة إلى الأفكار الأساسية للنظرية الوترية. ونأمل أيضاً أن يأخذ قراء هذا الكتاب فكرة مفيدة عن أسلوب كلام الفيزيائيين القادة ومحاكاتهم حول موضوع ذي أهمية عصرية. وقد كنا في أثناء إعداد هذه المقابلات نطلب ممن أسهموا فيها أن يتحدثوا دون كلفة وأن يتحاشوا بقدر الإمكان العبارات اللغوية المفرطة التخصص الشائعة بينهم. وكل واحد من هذه الأحاديث قائم بذاته، ويمكن أن يُقرأ بمعزل عن الآخرين. ومع ذلك عمدنا، كي ننسج روابط بينها، إلى كتابة مقدمة طويلة شرحنا فيها عدة أفكار أساسية يحتاجها القارئ ليفهم النظرية فهماً أكمل. وفي هذه المقدمة سيجد شرحين موجزين لنظرية الكم ونظرية النسبية، وصورة إجمالية للفيزياء الجسيمية.

ورغم أن موضوع الأوتار الفائقة مازال في طور مخاض سريع، إلا أن جوهر النظرية متوطد اليوم، ونأمل أن ينجح هذا الكتاب في إلقاء الضوء على ما يمكن أن يكون أعظم خطوة على طريق التقدم العلمي في عصرنا الراهن.

نود أخيراً أن نشكر الدكتور إيان موس I.Moss على مساعدته في التعامل مع الكلمات والآنسة أيلين درايبور A.Dryburgh على نسخ الأحاديث المسجلة.

**بول ديفيس**
**جوليان براون**

# 1

## مقدمة

### ١ ــ ١ . ما المقصود بـ «نظرية كل شيء» ؟

ما من علم أكثر طموحاً من الفيزياء ، لأن الفيزيائي يهدف إلى التعامل مع العالم كله كمجال لنشاطه . ففي حين ينحصر اهتمام البيولوجيين (علماء الحياة) بالعضويات الحية ، والكيميائيين بالذرات والجزيئات ، وعلماء النفس بالانسان وأضرابه ، الخ ، فإن الفيزيائيين ، كعلماء الدين ، ميالون إلى إنكار أن يكون أي شيء خارج دائرة اهتماماتهم .

والفيزيائيون بالطبع معترفون ، عن طيب خاطر ، بأن إدراكهم لمعظم الأمور ما يزال مع الأسف محدوداً عملياً . فالأشياء التي مثل الغيوم وندف الثلج صعبة جداً على «النمذجة» باستخدام قوانين الفيزياء المعهودة . والوضع هنا يشبه الوضع في الجمل البيولوجية حيث تتحدى أبسط الكائنات الحية ، كالفيروسات والجراثيم ، براعة الفيزيائي بتعقيداتها البالغة . لكن هذا العجز العملي صائر إلى الانحسار على أساس أن سلوك المنظومة المعقدة ، مهما كان غامضاً ، لا بدّ أن تحكمه في أعماقه قوانين الفيزياء **ولا شيء** سواها .

إن فكرة أننا لا نحتاج إلا لقوانين الفيزياء في سبيل فهم هذا العالم ، بدقائق تفاصيله ، نابعة من فلسفة الاختزالية reductionism . فأنصار هذه المدرسة الفكرية ، التي تضم عدة علماء ، يعتقدون أن علم النفس يمكن مبدئياً اختزاله تحت مظلة البيولوجيا ضمن الكيمياء ، والكيمياء في إطار الفيزياء . وبتعبير آخر ، يرى أصحاب هذا المذهب أن «سهم التفسير» يتجه دوماً نحو أعمق مستويات الحقيقة ، إلى أن يتاح في النهاية تفسير كل شيء بلغة المكوِّنات الأساسية للمادة . فالاختزالية تؤكد إذن أننا إذا عثرنا على نظرية متماسكة ، واضحة وناجزة ، بخصوص هذه المكونات فإنها ستكون ، بحد ذاتها ، نظرية كل شيء .

ليس في نيتنا هنا أن نناقش فيما إذا كان بالامكان الدفاع عن هذا المذهب الاختزالي، لكننا نقتصر على الإشارة إلى أنه أساس العقلية التي انطلق منها بعض الفيزيائيين مؤخراً لدى الكلام حول نظريات كل شيء، أو، رمزياً، **ن ك ش**. لكن من المهم أن نعلم أن مثل هذه النظرية لن **تشرح** كل شيء، كما لا «تشرح» مسلَّمات الهندسة، في الرياضيات، مبرهنة فيثاغرس. صحيح أن مبرهنة فيثاغرس يمكن استنتاجها من تلك المسلمات، لكن هذا البرهان يتطلب سلسلة محاكمات كثيرة التعقيد. لكن ما نريد قوله هو أننا، حتى لو تعرَّفنا العناصر الأساسية في فيزياء العالم، لا نستطيع أن نتوقع فهم شتى مظاهرها المعقدة كي نتبعها بشكل آلي. وهكذا فإن **ن ك ش** ستُبقي لدى الفيزيائيين مسائل دون حل، كمسألة نمذجة الغيوم وندف الثلج، فضلاً عن الأسرار الأعمق، كأصل الحياة أو ماهية الوعي البشري. ومع ذلك يرى فلاسفة الاختزالية أن تفسير كل هذه الأمور يمكن أن يُستخرج من **ن ك ش**.

إن أول **ن ك ش** (فيما نعلم) قد صيغت في القرن الخامس قبل الميلاد لدى الفيلسوفين الإغريقيين لوسيبوس Leucippus وديمقريطس Democritus. تقول نظريتهما، الموصوفة بالذرية Atomism، بأن العالم يتألف من ذرات وخلاء فقط. وفي هذه النظرية أجناس شتى من الذرات، لكن المفروض أن تكون كلها **عنصرية** Elementary، بمعنى أنها لا يمكن إفناؤها ولا تحطيمها. أي إن الذرات لا تتألف من أجزاء داخلية؛ فلا يمكن القول بأنها «مصنوعة من» أي شيء أصغر منها. فهي حتماً أصغر من أن تُرى مباشرة. وهي في حالة حركة دائمة في الخلاء. وكان يقال إن اللقاءات بين الذرات يمكن أن تسبب التصاق بعضها معاً فتولد الانطباع بالتواصل المادي وبأن كل تغير في الكائنات المتجسدة يمكن أن يُعزى إلى إعادة تنظيم تطرأ على تلك الذرات.

ثم جاءت النهضة العلمية الحديثة بفضل أعمال غاليليو ونيوتن في القرن السابع عشر، فاكتسبت النظرية الذرية دعماً باكتشاف قوانين حركة الأجسام المادية. فقد أصبح بالإمكان إدراك أن حركة الذرات أيضاً تخضع لقوانين فيزيائية معروفة جيداً. وهذا التقدم أوحى للعالم لابلاس Laplace بأن يخترع عفريته الحاسب المشهور:

□ إن الكائن الذكي، إذا عرف، في أية لحظة ما، كل القوى العاملة في الطبيعة وكل مواقع الأشياء التي صُنع العالم منها، فإنه يستطيع أن يُلمَّ بحركات أضخم الأجسام في العالم وحركات أصغر الذرات في صيغة واحدة، شرْط أن يكون لديه ما يكفي من القدرة على وضع هذه المعلومات موضع التحليل؛ فلا شيء مشكوك فيه بالنسبة له، بل إن المستقبل والماضي كليهما يصبحان حاضرين أمام عينيه. □

وهذا بالتأكيد محاولة نحو نظرية واحدة لكل الأشياء.

لكن من الواضح أن أموراً عديدة كانت غير موجودة في هذه النظرية التي أُريدَ منها أن تشرح كل شيء. فهي لم تتعرض إلى سبب كون العالم حاوياً ما يحويه من ذرات. كما أن مسألة مصدر هذه الذرات ومقادير كتلها والأشكال التي لها قد تُركت دون جواب. علاوة على أن طبيعة القوى الفاعلة بين الذرات كانت غامضة أيضاً بعض الشيء. صحيح أن نيوتن قدَّم نظرية في الثقالة، إلا أن هذه النظرية لم تكن ملائمة لتفسير القوى بين الذرات. زد على ذلك أن الفضاء الذي تتحرك فيه الذرات والزمن الذي تسبره في حركتها قد وُضعا خارج النظرية تماماً. كان يُنظر إلى المكان والزمان على أنهما قائمان بذاتهما وليسا جزءاً من الفيزياء. وعلى هذه الأسس لا يمكن إذن اعتبار أعمال غاليليو ونيوتن ولابلاس نظرية لكل شيء مرضية جداً.

لقد بقي الوضع على حاله عموماً حتى أوائل النصف الثاني من القرن التاسع عشر عندما أُضيفت إلى قوانين نيوتن في الميكانيك والثقالة نظريةُ مكسويل الكهرطيسية. ولفترة طويلة كان بالإمكان الظن بأن كل القوى الطبيعية يمكن أن تكون مظاهر للثقالة أو الكهرطيسية في هذا الظرف أو ذاك. ورغم أن وجود الذرات ظل دون تفسير، وأن المكان والزمن ظلا خارج الفيزياء، فقد اعتقد عدة فيزيائيين أن عملهم يقتصر بعد الآن على ربح رقم عشري جديد في قياسات شتى المقادير الفيزيائية. حتى إن لورد كلفن Kelvin قال في محاضرة ألقاها عام ١٩٠٠ أمام الجمعية البريطانية لتقدم العلوم: «لم يبقَ أمامنا الآن شيء جديد نكتشفه في الفيزياء. بقي علينا فقط أن نزيد في دقة القياسات». وهكذا ساد شعور بأن **ن ك ش** أصبحت في اليد.

وبإلقاء نظرة سريعة إلى الوراء نستطيع أن نرى صفة غير مرضية في أية **ن ك ش** مطروحة في **ذلك العصر، وهي أنها** تحتاج إلى افتراض وجود قوتين أساسيتين **اثنتين**: الثقالية والكهرطيسية.

لكن محاولة لإصلاح هذا العيب جرت حوالي عام ١٩٢٠ على يدي الرياضي تيودور كالوزا T.Kaluza الذي اكتشف رابطة ممكنة بين هاتين القوتين (نناقشها بتفصيل أكثر فيما بعد). وهكذا أمكن بروز نظرية جديدة مرشحة لتكون **ن ك ش** في وقت مبكر من هذا القرن رغم أن الفيزياء لم تكن بعد قد دخلت في دوامة مفاهيم جديدة.

لكن اكتشاف الإلكترون والنشاط الإشعاعي، ونجاح فرضية بلانك الكمومية وظهور نظرية أينشتاين في النسبية، كل ذلك أدى إلى استبعاد الأسس التي بنيت عليها فيزياء نيوتن ومكسويل. فقد هُجرت قوانين نيوتن الحركية والمفهومان الشائعان للمكان والزمان فيها. حتى إن فرضية ديمقريطس الذرية حلت محلها صورة لعالم الصغائر أكثر تعقيداً وتفصيلاً، فأصبحت

تنطوي على ذرات قابلة للتجزئة وذات مواقع وحركات معينة . وهكذا اتضح أن أسس الفيزياء القديمة قد انهارت .

وفي حوالي عام ١٩٣٠ توطدت نظريتان جديدتان ، ميكانيك الكم ونظرية النسبية العامة ، ونموذج ذري مفصَّل . ومع ذلك ظلت بعض التفاصيل غامضة وبدا أن الفيزياء ستعود مرة أخرى إلى مجموعة مبادئ بسيطة نسبياً . ورغم أن ما كان يُعتبر ذرة لا تتجزأ قد أصبح جسماً مركَّباً ، بقيت قائمةً صورة المادة على أساس أنها مؤلفة كلها من عدد صغير من جسيمات عنصرية ( إلكترونات وبروتونات ونترونات ) تتحكم بها قوانين النسبية وميكانيك الكم . وقد حدث فعلاً أن نشر إدنغتون Eddington ، في سَوْرة تفاؤل لا يقاوم ، عام ١٩٢٣ ، أوليات ما أسماه نظرية أساسية ، أي محاولة طموحة لتوطيد نظرية لكل شيء تعتمد على علاقات عددية غريبة . وقد استمر إدنغتون في تطوير أفكار من هذا القبيل إلى أن توفي عام ١٩٤٦ . كما أن أينشتاين أنفق معظم سنيه الأخيرة في البحث عن « نظرية حقل موحدة » تستند إلى توصيف الطبيعة بلغة هندسية بحتة .

لكننا نعلم اليوم أن الآمال المعقودة على **ن ك ش** معتمدةٍ على فيزياء عشرينيات هذا القرن كانت سابقة لأوانها . ذلك أن الاضطرار إلى فرضية النترينوهات ، واكتشاف البوزترون والميون وظهور القوى الإضافية الكامنة في نواة الذرة ، كانت ثمناً لا بد منه لفكرة أن القوانين الأساسية للعالم تعمل على صعيد التفاعلات بين الإلكترونات والنترونات والبروتونات . وبازدهار التجارب في **فيزياء الجسيمات** ظهرت طائفة كبيرة من جسيمات أصغر من الذرة وشبكة مذهلة من القوى ، فتبين أن الفيزياء أعقد بكثير مما كان يتوهم رجال العلم في عشرينيات هذا القرن .

وكان لا بد من انقضاء نصف قرن من الزمان بعد ذلك كي يغوص الفيزيائيون إلى أعمق مستوى في البنية التي ينبع منها هذا الثراء دون الذري ، وكي يقدموا نظرية مرضية بعض الشيء بخصوص المادة والقوى . ومع هذا الفهم الجديد تشجع بعض الفيزيائيين مؤخراً على مداعبة أمل جديد بالعثور على نظرية تفسر كل شيء في هذا العالم . ونظرية الأوتار الفائقة هي اليوم آخر صيحة في هذا المجال تُعقد عليها أكبر الآمال . والمنظومة النظرية التي انصبت فيها كل الروافد الفكرية الجديدة تتناول عالم صغريات الصغائر . فعالم الذرة ، أو فيزياء الجسيمات ذات الطاقة العالية ، أوسع بقرابة $10^{20}$ مرة من مملكة الأوتار الفائقة .

ماذا يمكن أن نتوقع من نظرية لكل شيء مرضية حقاً؟ عليها أولاً أن تشرح لماذا يرى الفيزيائيون تلك التشكيلة الجسيمية العنصرية التي يرونها، وأن تتنبأ صادقة بكل خصائصها الأصلية، كالكتلة والشحنة الكهربائية والعزم المغنطيسي وما إلى ذلك. وعليها ثانياً أن تقدم أوصافاً موثوقة لكل التفاعلات بين الجسيمات، أي أن لا تنطوي فقط على القوى الأساسية الطبيعية الأربع، بل أن تعطي أيضاً شداتها النسبية. وعلى الحسابات المستمدة من هذه النظرية أن تعطي بدقة القيم الملحوظة لشتى سعات تبعثر scattering الجسيمات بعضاً ببعض، ووتائر تفككها، الخ. وباختصار، يجب على النظرية أن تتيح حساب كل العوامل المقيسة في فيزياء الجسيمات. زد على ذلك كله أن عليها أن تشرح هندسة الزمكان spacetime وخصائصه التوبولوجية، كعدد الأبعاد المحسوسة، وأن تشرح شرحاً مقنعاً كيف جاء هذا العالم إلى الوجود.

لكن هذا ليس كل شيء، بل عليها أيضاً أن توحّد الفيزياء.

## ١ ـــ ٢. الوحدة في قلب الطبيعة

لكل امرئ الحق في أن يحاول بناء نظرية لكل شيء. إنه لا يملك، في سبيل ذلك، سوى أن يأخذ الكتب التعليمية، وأن يكتب كل القوانين الأساسية، وأن يحصي كل الجسيمات دون الذرية المعروفة والقوى الفاعلة فيما بينها، وأن يتفحص كل هذه المعلومات. هنا تكمن النظرية، هنا يكمن كل ما تريد أن تعرف عن هذا العالم!

فأين العلة في هذا التناول؟ إن المشكلة جمالية في بعض جوانبها: على غرار جدول غير مرتب. إن كل **ن ك ش** جيدة يجب أن تتألف من أكثر من مجرد قائمة تحوي القوانين والأغراض الأساسية. يجب أن يكون لديها القدرة على التعليل، كما يجب عليها أن تحوك **روابط** بين شتى أوجه الطبيعة. ولا شك أن البحث عن نظرية من هذا القبيل مسألة عقيدة إيمانية إلى حد ما، عقيدة مبعثها الإيمان العميق بأن الطبيعة لا بد أن تكون بسيطة.

ومن المقبول عموماً أن النظرية العلمية تكون أكثر مقدرة وإغراءً كلما قل عدد فرضياتها المستقلة. ومن عادة النظريات أن تحوي عوامل حرة يحتاج تعيينها إلى التجربة. وبتطويرات لاحقة يمكن للنظرية أن تعطي قيم هذه العوامل. ولكي نضرب مثلاً نموذجياً نسوق قانون ستيفان ـــ بولتزمان في الإشعاع. كان هذا القانون، عند اكتشافه عام ١٨٨٠، يقول بأن كثافة الطاقة التي يُشعها جسم أسود متناسبة مع الأس الرابع لدرجة حرارته المطلقة. وقد تم تعيين ثابتة التناسب بالتجربة. ولكن عندما تأكد نجاح نظرية بلانك الكمومية عام ١٩٠٠ تبين أن هذه الثابتة ليست

من ثوابت الطبيعة الأساسية ، بل أنها مشتقة من ثوابت أخرى في الفيزياء هي : سرعة الضوء وثابتة بلانك وثابتة بولتزمان .

وقد ثبت بالخبرة العلمية في عدة مناسبات أن التوغل إلى أعماق الظواهر يكشف مزيداً من العلاقات فيما بينها ويقلل بالتالي من عدد الثوابت الاختيارية التي يحتاج تعيينُها ، في النظرية ، إلى التجارب المباشرة . فعلى هذه الشاكلة تحسن المفهوم الحديث للذرة عما كان عليه في الفيزياء القديمة ، إذ تبين كيف يمكن لأنواع عديدة من الذرات أن تتألف من عدد صغير من المكوِّنات الأساسية . واليوم يمكن للخواص الفيزيائية والكيميائية للذرات المتخالفة أن تترابط منهجياً في إطار خصائص مكوِّناتها .

إن **ن ك ش** النهائية المثالية يجب أن لا تحتاج إلى التجربة بتاتاً ! فكل شيء فيها يجب أن يتعين في إطار أشيائها الأخرى ، باستثناء عامل واحد فقط هو سُلَّم الوحدات الذي نعتمده في تعيين كموم عناصر النظرية ؛ وهذا وحده ما يجب تحديده بالتجربة . ( في هذه الحالة النهائية تقتصر فائدة التجربة على تحديد اتفاق يُصطلح عليه في عمليات القياس . لكنها لا تعين أياً من العوامل في النظرية . ) ومثل هذه النظرية يجب أن تستند على مبدأ واحد وحيد ، مبدأ تنبع منه مجريات الطبيعة كلها . ومن المحتمل أن يكون هذا المبدأ صيغة رياضية موجزة تنطوي بمفردها على الفيزياء الأساسية برمتها . وبهذا الصدد يقول ليون ليدرمان **L.Lederman** ، مدير فرميلاب **Fermilab** — المركز الذي يضم مسرِّع الجسيمات العملاق قرب شيكاغو — عن هذه النظرية إنها ستكون دستوراً يمكن أن « تحمله في جيب قميصك » .

إن المحاولات الهادفة لتوحيد الفيزياء تسلك خطتين مختلفتين بعيدتي المدى . يقال إن إحداهما تتناول الموضوع « من الذروة للأسفل » ، فتنطلق من مبدأ عام عريض يمكن تبريره على أساس من الأناقة والبساطة وعلى الأرجح بصيغة رياضية مختصرة ، ثم يتجه العمل نحو توصيف العالم وصولاً في نهاية الأمر إلى تنبوءات نوعية .

كانت معظم أعمال أينشتاين تنبئ عن مقدرة هذا الطريق . كان نشوء نظريته في النسبية العامة يعتمد على مبدأ التكافؤ بين القوة الثقالية والقوة العطالية ، ومن العقيدة بأن الفيزياء يجب أن تكون مستقلة عن جملة الإحداثيات ( مرجع المقارنة ) التي ندرس الأحداث فيها . ومن هاتين الفكرتين الأساسيتين البسيطتين توصل أينشتاين إلى معادلاته بخصوص الحقل الثقالي . لقد اشتهرت هذه المعادلات ذاتها بأناقتها وبساطتها وكثافتها . لكن حل هذه المعادلات ليس بسيطاً في الأحوال العامة . فحساب حركات الكواكب ، مثلاً ، أو إصدار الاشعاع الثقالي عن النجوم المثناة ،

حساب معقد جداً؛ هذا لدرجة أن مجمل نتائج هذه النظرية، بعد مضي أكثر من ستين عاماً على تأسيسها، لم تُكتشف بعد.

أما الخطة الثانية، خطة «من الأسفل إلى الذروة»، فهي على الأرجح أكثر شيوعاً. هنا ينطلق المرء من الظواهر التجريبية. فالتجارب المخبرية تقدم مجموعة من المعطيات الخام يُعمد إلى تنظيمها بشكل منهجي، وقد استُنتجت منها بعض التنظيمات. وقد قادت هذه التنظيمات إلى فرضيات نوعية نجم عنها قوانين أكثر عمومية. ومنها استُنبطت نبوءات بخصوص ظواهر في مجالات جديدة وأُجريت تجارب للتأكد من صحة هذه النبوءات. وشيئاً فشيئاً يحوك رجل العلم روابط هنا وهناك، وبشيء من الحظ يتفق له أن يصنع نظرية تفوق في نجاعتها مجموع أجزائها. وفي فيزياء الجسيمات أمثلة عديدة على نجاح هذه الخطة. فالنظرية الكواركية، مثلاً، انبثقت من مراحل متوالية في عملية تصنيف جسيمات شتى، متخالفة ظاهرياً، في طوائف (أو عدودات multiplets) أوحت بها تشابهات فيزيائية متنوعة استُمدت من التجارب. ومزية هذه الطريقة، من الأسفل إلى الذروة، أنها تتحاشى التمادي في الابتعاد عن الطريق الذي ترسمه التجربة، وإذا قادت التجارب إلى الابتعاد عن الأناقة الفلسفية، فذلك من سوء حظ الفلسفة.

إن تاريخ الفيزياء هو تاريخ مراحل توحيد متوالية. فقد برهن نيوتن مثلاً على أن حركة الأجرام السماوية تتفق مع القوانين التحريكية والثقالية المسيطرة على سلوك الأجسام عند سطح الأرض. ثم وحَّد مكسويل قوانين الكهرباء والمغنطيسية، وأقام فوق ذلك رابطة بين نظرية الحقل الكهرطيسي والضوء وذلك بإثبات أن الضوء ليس سوى أمواج كهرطيسة. أما أينشتاين فقد اكتشف رابطة بين المكان والزمان، وأخرى بين الطاقة والمادة، وذهب بعد ذلك إلى ربط الزمكان بالثقالة.

وفي السنين الأخيرة جرت، لتوحيد قوى الطبيعة أكثر من ذلك، محاولات تركزت على فيزياء الجسيمات في مجال الطاقات العالية. وسبب ذلك أن سبر الطبيعة في أعماق متزايدة يقتضي المزيد من طاقة الجسيمات المستخدمة. وفي هذا الميدان يوجد نظريتان كبيرتان، أولاهما نظرية النسبية والثانية نظرية الكم. وتعتمد كل محاولات التوحيد الراهنة على افتراض أن هاتين النظريتين يجب أن تتحدا بشكل مكشوف. وقبل أن نفحص فيزياء الجسيمات علينا إذن أن نوجز كلاً منهما.

## ١ ـــ ٣ . نظرية النسبية

لقد اتضح، في نهاية القرن الماضي، أن قوانين نيوتن في الميكانيك لا تتفق مع نظرية مكسويل في التحريك الكهربائي (الالكتروديناميك) بخصوص نسبية الحركة. فالحركة المنتظمة (ثابتة السرعة في خط مستقيم)، في رأي غاليليو ونيوتن، هي حركة يجب أن تنسب إلى مرجع مقارنة؛ أي إن الحركة لا يمكن أن تولِّد أي مفعول فيزيائي مطلق. فالركاب الجالسون في طائرة تسير بسرعة ثابتة في خط مستقيم لا يشعرون بتاتاً بحركتها، ولا يمكن أن يتأكدوا من هذه الحركة إلا إذا قارنوها بشيء خارج الطائرة، كأن ينظروا من نافذتها ويروا الأرض تتحرك بالاتجاه المعاكس. ومن جهة أخرى تتنبأ معادلات مكسويل بأن الأمواج الكهرطيسية، كالضوء، تسير بسرعة ثابتة بالنسبة للفضاء الحر. فسرعة الضوء ثابتة من ثوابت الطبيعة. لكن النظرية لا تقول أي شيء بخصوص مرجع المقارنة الذي يجب أن تُقاس هذه السرعة بالنسبة له. كان هناك رأي يقول بأن الفضاء مليء بهيولة غير مرئية، أسموها الأثير، ينتشر الضوء فيها. كان الأثير إذن مرجع مقارنة كونياً ساكناً سكوناً مطلقاً يمكن أن تُنسب كل الحركات إليه. كان يبدو أن هذه الفكرة توفِّق بين نظرية مكسويل وبين مبدأ النسبية الذي قال به غاليليو ونيوتن. لكن التجارب التي استهدفت قياس سرعة الكرة الأرضية بالنسبة للأثير أعطت لهذه السرعة قيمة معدومة! كانت هذه النتيجة تناقضاً مأساوياً، لأنها توهم بأن الأرض ساكنة في الفضاء وأن كل ما في السماوات يدور حولها!

لكن أينشتاين نشر عام ١٩٠٥ ما يسمى اليوم نظرية النسبية الخاصة، وكانت تهدف إلى الخروج من هذا المأزق. لقد اختار أينشتاين أن يدعم مبدأ النسبية ـــ إن الحركة المنتظمة في خط مستقيم نسبية بحتة ـــ وأن يرفض فكرة الأثير؛ فقال بأن سرعة الضوء تظل على قيمتها في كل مراجع المقارنة. وهذا يعني أن الضوء، مهما كانت سرعة منبعه وسرعة من يرصده، يمر بالراصد بسرعة مطلقة الثبات. أي إن أي راصدين يتحرك أحدهما بالنسبة للآخر، سيجدان لقياس سرعة الإشارة الضوئية **الواحدة** قيمة عددية **واحدة**.

إن هذا المبدأ النسبوي الجديد، أي ثبات سرعة الضوء بالنسبة لكل المراجع، ينطوي على مخالفة للأفكار الشائعة عن المكان والزمن. فالتناول النيوتني للمكان والزمن والحركة، خصوصاً، يجب أن تحل محله نظرية نسبوية **relativistic** جديدة. وبيت القصيد في هذا التفكير النسبوي، بخصوص المكان والزمان، أن المسافات المكانية والفترة الزمنية سيكون لها قيم تختلف باختلاف الحالة الحركية للراصد الذي يقيسها. ومن هذا المنطلق نقول إن فترة الساعة الزمنية، مثلاً، يمكن

أن تُقاس كنصف ساعة فقط على ميقاتية إنسان في مركبة فضائية تسير بسرعة بالغة العظم. وهناك ظاهرة مماثلة بخصوص المسافات. لكن هذه المفعولات النسبوية صغيرة الشأن جداً إذا كانت سرعة الراصد صغيرة إزاء سرعة الضوء. أما في فيزياء الجسيمات العالية الطاقة فإن الجسيمات تسير بسرعة قريبة جداً من سرعة الضوء، فتعاني كثيراً من هذا التمدد الزمني. وهذا المفعول واضح الأثر في واقع أن الجسيمات القلقة جداً تعيش وهي متحركة في حلقة المسرع الجسيمي، قبل أن تتفكك، فترة (على ميقاتية الراصد في المختبر) أطول بكثير من فترة حياتها وهي ساكنة.

إن لهذه التفاوتات المكانية والزمانية تأثيراً كبيراً في قوانين الميكانيك. فالجسم المتحرك يزن، مثلاً وبمجمل العبارة، أكثر مما يزن وهو ساكن، إذ إن كتلته تزداد بازدياد سرعته. وهذا يعني أن مفهوم الكتلة ينطوي على بعض الغموض. ويُعرِّف الفيزيائيون كتلة الجسم على أساس أنه ساكن (بالنسبة للراصد الذي يقيسها). لكن الكتلة الواقعية (أو قل الكتلة النسبوية)، المتمثلة مثلاً بعطالة الجسم، تعتمد على سرعته، وتزداد بلا حدود لدى اقتراب سرعته من سرعة الضوء. ولدى دراسة علاقة الكتلة بالسرعة والطاقة في نظرية النسبية يتبين أن الكتلة والطاقة شيئان متكافئان، أي إن للطاقة كتلة وأن الكتلة شكل من أشكال الطاقة. وتنطوي النظرية أيضـاً على أن الكتلة يمكن إفناؤها، في ظروف معينة، وتحويلها إلى نوع طاقي آخر. وبالمقابل يمكن خلق كتلة مادية من طاقة. وهذه الإمكانات كلها محتواة في علاقة أينشتاين الشهيرة: $E = mc^2$، حيث تمثل c سرعة الضوء، وتمثل m كتلة تتحول إلى (أو تنجم عن) طاقة E.

وكنتيجة لهذه الأفكار لا يمكن لأي جسيم أن «يخترق جدار الضوء»؛ أي يستحيل علينا أن نجعل الجسيم، مهما سرَّعناه، يمر من سرعة أصغر من سرعة الضوء إلى سرعة أكبر منها. ولإدراك هذه الاستحالة نذكر أن بلوغ الجسيم سرعة الضوء يجعل كتلته لا نهائية الكبر، مما يقتضي صرف طاقة لا حدود لها كي يتسارع إلى هذا الحد، وهذا شيء مستحيل.

إن وجود هذا الحد لا يعني حتمـاً أن لا شيء يمكن أن يسير بسرعة الضوء، لأن الفوتون يفعل ذلك. ولكي يبلغ الجسيم سرعة الضوء يجب أن تكون كتلته السكونية معدومة (لا كتلته الحركية، لأن مثل هذا الجسيم لا يمكن أن يكون في حالة سكون). وفوق ذلك لا تنفي نظرية النسبية نفياً باتـاً إمكانية وجود جسيم يسير بأسرع من الضوء. وأمثال هذه الجسيمـات الافتراضية تسمى **تاخيونات** tachyons؛ لكن نظرية النسبية تمنع هذه الجسيمات من اختراق جدار الضوء بالاتجاه المعاكس، أي إنها لا تستطيع أبداً أن تسير بأبطأ من الضوء. وبموجب معادلات النسبية لا بدّ أن تكون الكتلة السكونية للتاخيون عدداً تخيلياً (أي الجذر التربيعي لعدد

سالب ) . ومن المربك أن تكون الكتل السكونية للتاخيونات كميات قابلة للقياس ، ولكن لما كان محظوراً عليها أن تسير بأبطأ من الضوء فلا سبيل أبداً لإيقافها عن الحركة .

ورغم أن التاخيونات غير ممنوعة في النظرية ، فإن معظم الفيزيائيين يشمئزون منها . أولاً ، لأن حركتها التي هي أسرع من الضوء تعني أنها قادرة ، في ظروف معينة ، على صعود سُلّم الزمن نحو الماضي . ولو كانت تستطيع أيضـاً أن تتفاعل مع المادة العادية لأتيح لها أن تنقل رسالات إلى ماضي الزمان ، مما يُيسِّر إمكانية كل أنواع المفارقات السببية الخرقاء . وقد جرت محاولات لتطويق هذه الغرائب بإعادة تحديد اتجاه الزمن على طول مسارات تاخيونات من هذه القبيل (أي على أساس أن التاخيون المتقهقر في الزمان من الموضع A إلى الموضع B هو تاخيون يتقدم في الزمان من الموضع B إلى الموضع A ) ولكن من المشكوك فيه منطقيـاً أن يكون ذلك ممكنـاً .

إن التحولات التي تطرأ على الفواصل المكانية والزمنية في نظرية النسبية تنطوي على أن المكان والزمان يشكلان جزءاً من الفيزياء ، لا مجرد مسرح تحدث عليه أحداثها . والواقع أن طريقة عمل هذه التحويلات تُظهر أن المكان والزمان محبوكان معـاً في كينونة واحدة متكافلة متضامنة ، وأن علينا أن نتخذها متصـلا continunm واحداً ذا أربعة أبعاد نسميه **الزمكان** . ولهذا السبب يرى الفيزيائيون أن العالم الذي نعيش فيه ذو أربعة أبعاد لا ثلاثة .

ثم كان أن تبيَّن لأينشتاين أن نظرية النسبية لا تعني فقط هجران أفكار نيوتن عن المكان والزمان وقوانينه الميكانيكية ، بل ونظريته أيضـاً . فالقوى الثقالية في نظرية نيوتن تعمل عن بعد قافزة فوريـاً فوق المسافات الفاصلة بين الأجسام . لكن هذه الفكرة تخرق نظرية النسبية لأنها تعني أن المفعولات الثقالية تسير بأسرع من الضوء .

لقد اضطلع أينشتاين ببناء نظرية جديدة في الثقالة تعتمد على تعميم نظريته النسبوية . وقد أنفق في هذا العمل عدة سنين ، حتى أنجز المهمة عام ١٩١٥ . كان أينشتاين في النظرية « الخاصة » الأصلية مهتمـاً بالحركة المنتظمة وحدها . والجسم ، إذا تسارع ، لا تظل حركته مجرد حركة تُنسب إلى مرجع مقارنة . فالمسافر في الطائرة ، مثلاً ، يشعر حتمـاً بحركتها إذا انعطفت أو هبطت فجأة . ولكي يُدخل هذا النوع الحركي الأعم أخذ أينشتاين في الحسبان أن التسارع يولِّد قوى لا يمكن تمييزها عن الثقالة . وعلى هذا الأساس يقال عن القوة النابذة centrifuge في الحركة الدورانية إنها تشكل « ثقالة مصطنعة » . وكثيراً ما يستعمل رجال الفضاء عبارة « القوة ج : g force » للدلالة على القوة الفاعلة في الصاروخ الفضائي في أثناء تسارعه الكبير .

كان التكافؤ بين التسارع والثقالة معروفـاً لدى غاليليو ونيوتن ، لكن أينشتاين رفعه إلى سُدَّة مبدأ أساسي في الطبيعة . ويُدرس عادة من خلال صلته بالأجسام الساقطة في حقل الثقالة .

فإذا أُتيح للجسم أن يسقط بملء حريته، يحدث توازن بين «القوة ج» الناجمة عن تسارعه الهابط وبين ثقله. وعلى هذا فإن الراصد الذي في حالة سقوط حر ينعدم وزنه. وهذا الظرف معروف اليوم لدى ملاحي الفضاء وهم في مركبة تدور حول الأرض، لكن أينشتاين اضطر في عصره إلى تخيل راصد في مصعد يهبط هبوطاً حراً.

لما كانت محتويات المصعد الساقط بحرية عديمةَ الوزن حقاً، فإن الأجسام المتجاورة فيه لا تغير مواضعها النسبية. لكنها، لدى النظر إليها من مرجع راصد واقف على الأرض، تُرى هابطة كلها بتسارع واحد، وهذا هو الواقع الذي يجعل الأجسام المنطلقة معاً من ارتفاع واحد تسقط متصاحبة وتصل إلى الأرض في لحظة واحدة، مهما كان وزن كل منها وتركيبه الكيميائي. (يقال إن غاليليو برهن على هذه الحقيقة بوساطة عدة كرات تركها تسقط حرة من قمة برج بيزا المائل.)

وبدقيق الكلام، هناك ثلاثة أمور نهملها كي يكون هذا القول صحيحاً تماماً، أولها مقاومة الهواء ولا يمكن تحاشيها. (يمكن للتجربة أن تعمل بشكل أحسن على سطح القمر لأنه خال من الجو) وثانيها قوى التجاذب الثقالي الضعيفة بين أجسام المصعد، وهي قوى يمكن إهمالها تماماً إذا كانت الأجسام خفيفة جداً؛ فهذه الأجسام تسلك خطوط قوى الحقل الثقالي دون أن تسهم فيها بشكل محسوس، ولذلك تسمى أجسام اختبار.

وثالث الأشياء التي أهملناها أعلاه يخص كروية الأرض. ولئن كان هذا المفعول صغيراً جداً إلا أن له شأناً حاسماً في فهم الثقالة. ولمعرفة السبب انظر الشكل ١ الذي يمثل مصعداً فيه جسما اختبار ويسقط نحو الكرة الأرضية. فإذا أهملنا انحناء سطح الأرض يصبح مسارا الجسمين متوازيين تماماً، فلا تتغير المسافة بينهما. لكن الواقع أن كلا الجسمين يتجهان في خط مستقيم نحو مركز الأرض. فيتقارب مساراهما إلى أن يلتقيا عند هذا المركز. وعلى هذا لو كان في المصعد راصد لا يرى شيئاً خارجه فإنه سيكون قادراً على استنتاج كروية الأرض من دراسة حركة تقارب الجسمين.

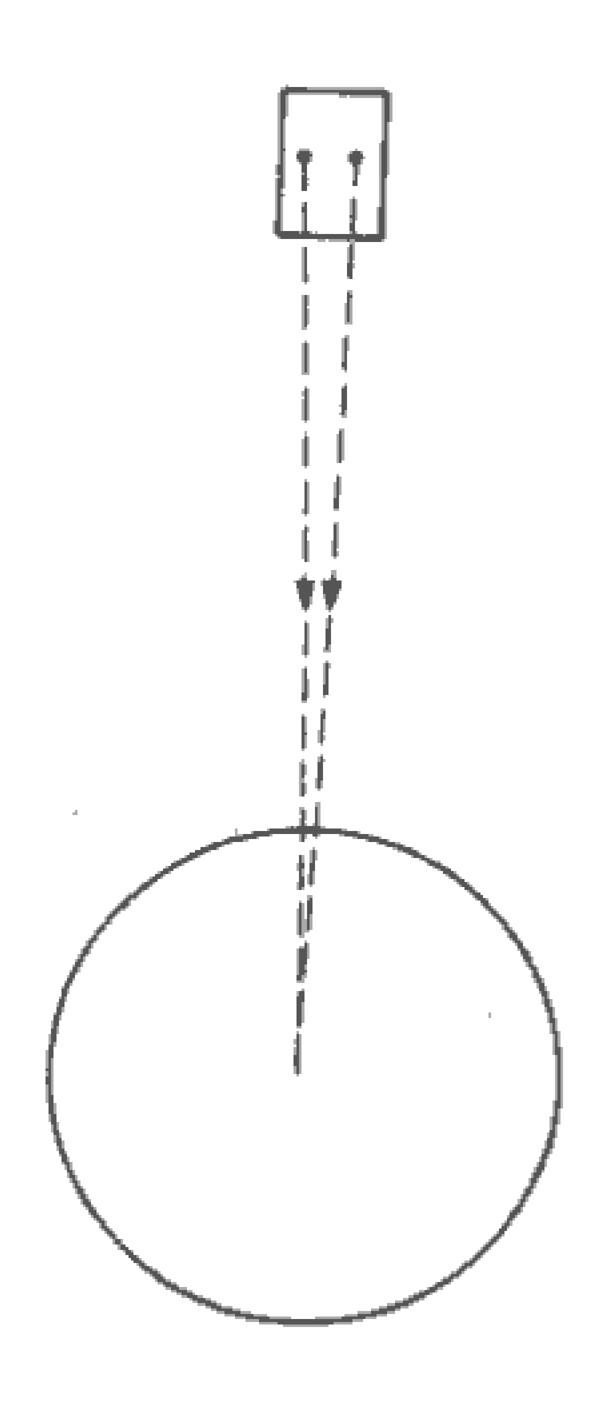
يمثل الشكل ٢ (a) وضع أربعة أجسام في مصعد تحتل رؤوس مربع. ففي أثناء هبوط المصعد يتقارب الجسمان الموجودان على القطر الأفقي كما رأينا قبلاً. لكن الجسمين الواقعين على القطر الشاقولي يتباعدان كلما اقترب المصعد من الأرض لأن ثقالة الأرض تشتد على الأجسام التي هي أقرب إليها بما يتناسب عكسياً مع مربع المسافة بين الجسم ومركز الأرض، مما يجعل قوة الجذب الثقالي على الجسم السفلي أشد منها على الجسم العلوي، فيهبط الجسم العلوي بأبطأ من

الجسم السفلي. وبنتيجة ذلك كله يقصر القطر الأفقي ويمتط القطر الشاقولي، فيصبح المربع مُعيَّناً يتطاول شاقولياً وينضغط أفقياً كلما ازداد اقترابه من الأرض، كما هو مبين (مع المبالغة) في الشكل ٢ (b).

وهكذا تُبيِّن تجربة المصعد هذه أن سقوطه الحر يجعله في أثناء ذلك مرجعاً ينعدم فيه إجمالياً مفعول الثقالة. ومع ذلك يظل هذا المفعول محسوساً إذا بقي الحقل الثقالي غير نسيق (أي غير متوازي الخطوط)، وذلك من خلال الانتقال الزهيد لأجسام الاختبار. وهذه الآثار الثقالية الطفيفة تسمى قوى «المد والجزر tidal» لأنها المسؤولة عن حركتي المد والجزر عند شواطئ المحيطات بفعل الحقل الثقالي للقمر.

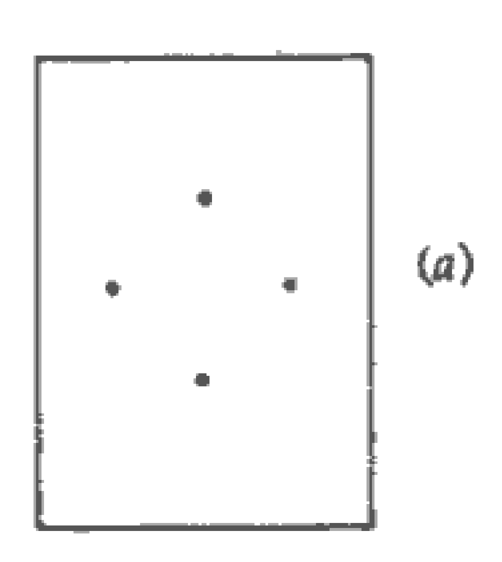
قد يقول امرؤ إن القوى الثقالية الإجمالية قوى نسبية يشعر بها المرء في مرجعه الخاص، في حين أن قوى المد والجزر مطلقة وتمثل الحقل الثقالي الحقيقي. وبذلك يكون حقل المد والجزر هو

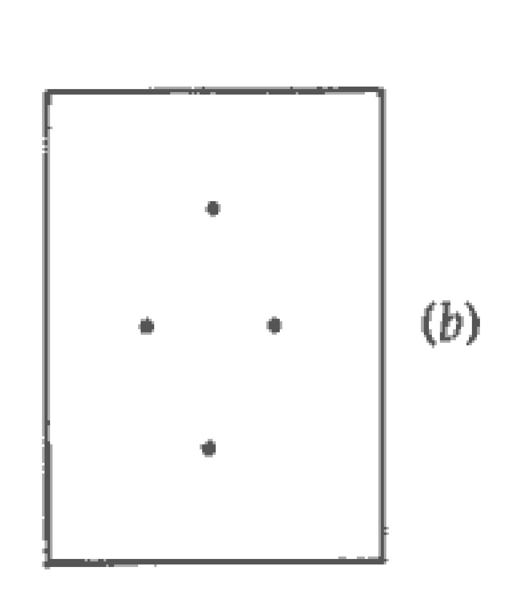
**شكل ١**. إن الجسيمين المتجاورين، اللذين يسقطان حرين، يتقاربان أحدهما من الآخر، في أثناء السقوط حتى يلتقيا في مركز الأرض.



الحقل الذي سعى أينشتاين إلى توصيفه في معادلات النسبية العامة. لكن بيت القصيد هو أن تشوه الأشكال الهندسية، كما يحدث للمربع أدناه، مستقل عن تركيب أجسام الاختبار وعن كتلها (إذا بقيت هذه الكتل غير كبيرة بما يُفقدها صفة الاختبارية) وهذا يوحي بأن التشوهات المعنية يجدر أن تعتبر خاصة من خواص الفضاء الذي تسقط فيه الأجسام، لا نتيجة للقوى المتسلطة على الأجسام. أو، بتعبير آخر، يستطيع المرء أن يقول إن الأجسام تسقط حرة في فضاء

**شكل ٢**. (a) أربعة جسيمات تحتل رؤوس مربع وتسقط بملء حريتها. (b) إن الفروق الثقالية الضئيلة تحول المربع إلى معين. لأن الجسيم السفلي أقرب إلى الأرض فتؤثر فيه بقوة أشد وتجعله يسقط بسرعة أكبر؛ وذلك بعكس ما يحدث للجسيم العلوي. أما الجسيمان الجانبيان فيسقطان بسرعة واحدة وكما هو مشروح في الشكل ١.

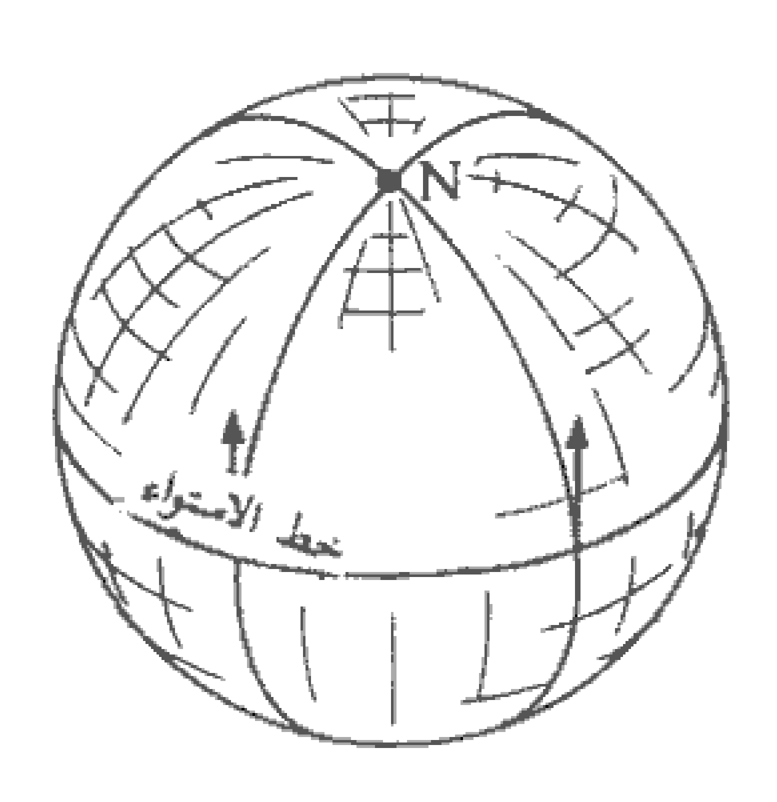


مشوه هندسياً ، أو معوجّ ، وذلك أفضل من حديث القوى . وهكذا توصل أينشتاين إلى فكرة أن الثقالة قد لا تختلف عن الهندسة في شيء ــ إنها تشويه يطرأ على هندسة الفضاء .

دعونا إذن نفحص هذه الفكرة بتفصيل أكثر . هناك ، أولاً ، نقطة هامة : إن نظرية النسبية تربط بين المكان والزمن ، وتنبئ بالفعل عن تشوه في الزمكان ، ضاربة صفحاً عن فكرة فضاء مستقل بذاته . (إن الزمكان المشوه قد ينطوي ، أو لا ينطوي ، على فضاء مشوه . ) وقد تعلّمنا في المدرسة الهندسةَ الإقليدية الملائمة للسطوح المنبسطة ، وفي الأبعاد الثلاثة المكانية للفضاء المنبسط . لكن قواعد الهندسة مختلفة عن ذلك في السطح المنحني ، كما هو واضح في الشكل ٣ . فعلى سطح الكرة يستحيل رسم خطوط متوازية مثلاً . وما يقابل الخطوط المستقيمة هي ، على سطح الكرة ، دوائرها العظمى ، كخطوط الطول . وقد رسمنا خطين من هذا القبيل . إنهما ينطلقان متوازيين من خط الاستواء ، لكنهما يتقاطعان عند القطب الشمالي . وهذا التشوه في الخطوط ، أو المسارات ، على السطح المنحني يشبه تشوه مسارات أجسام الاختبار الساقطة حرة في حقل ثقالي غير نسيق . والفرق الرئيسي هنا هو أن الهندسة المشوهة ليست في بعدين (ولا حتى في ثلاثة أبعاد ) : إنها في ثلاثة أبعاد مكانية وواحد زمني . ومع أن التصور البصري لهذا الانحناء بالغ الصعوبة في أربعة أبعاد ، إلا أنه واضح الصورة في الرياضيات .

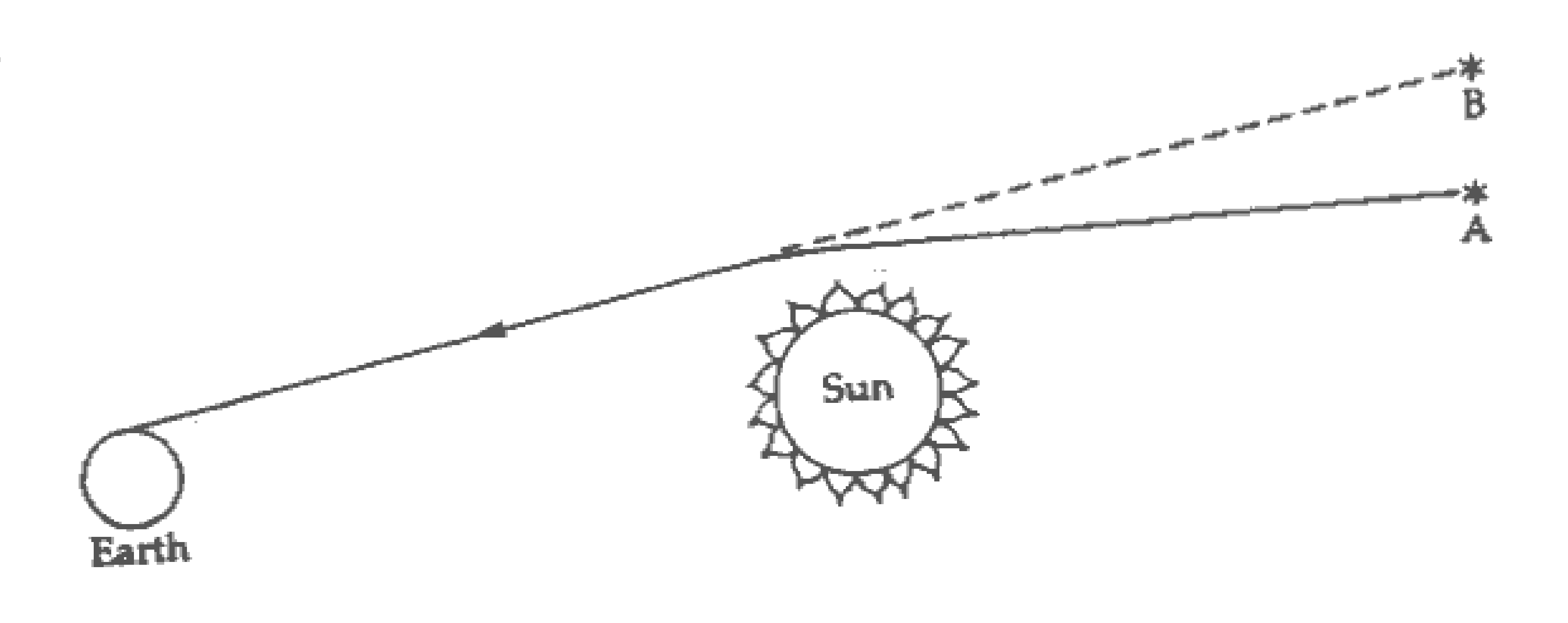
**شكل ٣** . جيوديزيات منحنية . لما كانت هندسة الأرض غير مستوية فإن أي خطين « مستقيمين » ( جيوديزيين ) متوازيين عند خط الاستواء ، يتقاربان ويلتقيان عند القطب الشمالي . إن هذا يشبه الفروق في شدات القوى ، تلك الفروق التي تؤدي إلى تقارب الجسيمين في أثناء سقوط المصعد .



إن نظرية أينشتاين في النسبية العامة تتعامل مع الحقل الثقالي على أنه حقل تشوه هندسي، انحناء أو اعوجاج في الزمكان. فالأجسام الساقطة بحريتها لا تُعتبر، في هذه النظرية، خاضعة لقوى ثقالية، بل تسلك المسار الأكثر «استقامةً» (ويسمى الخط الجيوديزي geodesic) في زمكان منحنٍ. ففي نظرية نيوتن الثقالية يقال إن الكرة الأرضية تدور حول الشمس لأن ثقالة الشمس تجبرها على الحيود عن خط حركتها المستقيم الطبيعي. أما في نظرية أينشتاين فلا توجد قوة ثقالية (ومع ذلك سوف نستمر في استعمال عبارة «قوة الثقالة»)، لكن الشمس تُحدث تكوُّراً في الزمكـان المجاور لها، وفي هذا الزمكـان المنحنـي تسير الأرض على خط جيوديـزي (أحـد «مستقيمات» الزمكان المكوَّر). فالثقالة تُعالَج كمفعول هندسي لأنها تشمل الكون كله؛ وهي تؤثر في كل أجسام الاختبار بأسلوب واحد. حتى إن الضوء يسلك مساراً منحنياً في الحقل الثقالي؛ ويمثل الشكل ٤ تأثير ثقالة الشمس على شعاع قادم إلى الأرض من نجم بعيد، فينحني الشعاع انحناءً يمكن قياسه. وفي سلَّم المدى الكوني تتوزع المجرات في العالم كما تريد هندسة الفضاء.

إن من شأن إمكانية أن يعمَّ الكونَ انحناء فضائي في رحابه أن تطرح مسألة هامة بخصوص توبولوجية(*) هذا العالم. فإذا كان الفضاء منبسطاً فلا بدّ أن يكون لا نهائي الاتساع أو أن يكون له

**شكل ٤** . الضوء ينحني بفعل الثقالة. إن ثقالة الشمس تحني الحزمة الضوئية بما يجعل النجم البعيد A يبدو من الأرض منزاحاً نحو الوضع B. يمكن رصد هذا الانزياح وقياسه في أثناء كسوف شمسي عندما يحجب القمر نور الشمس المبهر فيتيح رؤية النجوم في النهار.




(*) الخواص الرياضية التي تظل قائمة في الكائنات الهندسية وهي تعاني تشوهاً مستمراً. ولا يهتم هذا العلم بمفهوم المسافة. (المترجم)

حدود من نوع ما . **أما إذا كان الفضاء منحنياً فهناك إمكانات أخرى . فكّر في الشكل الذي** يمكن أن تتخذه ورقة ذات بعدين . يمكن أن تكون الورقة ذات شكل كروي مغلق ، مثلاً ، أو بشكل سطح سواري ( شكل ٥ ) . ( تذكر أن الكرة ، مع أنها جسم ذو ثلاثة أبعاد ، لها سطح ذو بعدين فقط . ) ويمكن أن نتمثل نسخة ثلاثية الأبعاد لسطح كروي مغلق يسمى كرة فوقية hypersphere . فإذا كان لهذا العالم توبولوجية كرة فوقية يكون من شأنه أن يمتلك حجماً محدوداً ، ولكن دون أن يكون للفضاء حدود أو حافات . ونحن نجهل التوبولوجية التي يملكها الفضاء فعلاً ؛ لكن هذه المعرفة ذات شأن حاسم في نظرية الوتر الفائق ، كما سوف نرى .

## ١ ـــ ٤ . النظرية الكمومية

إن نظرية النسبية تدعونا إلى هجر بعض أفكارنا العزيزة بخصوص المكان والزمان والحركة . إنها تضع في محل فيزياء نيوتن الحدسية صورة أكثر تجريداً ، بكل معنى الكلمة ، وتنطوي على مفاهيم ، كالزمكان المعوجّ ، يصعب تصورها أو يستحيل . وليست نظرية الكم أقل شأناً بهذا الصدد ، فهي تتطلب أيضاً إعادة نظر جذرية في الأفكار الشائعة بخصوص طبائع المادة .

بدأت النظرية الكمومية رحلتها عام ١٩٠٠ حين اقترح ماكس بلانك M.Planck فكرة أن الإشعاع الكهرطيسي ينبثق على شكل صُرر ، أو كموم ، نسميها اليوم فوتونات . ويمكن اعتبار الفوتون ، بمعنى ما ، جسيم الضوء . وهذه الفكرة صعبة الانسجام مع الافتراض القديم بأن الضوء والإشعاعات الكهرطيسية الأخرى تتألف من موجات . وقد حُلّ هذا التناقض الظاهري بمفهوم **المثنوية** duality **موجة/جسيم** ، التي تعني أن الضوء يمكن أن يتجلى كموجات أحياناً وكجسيمات أحياناً أخرى ، وذلك بحسب الطريقة المتّبعة في رصده ، أي بحسب الجهاز التجريبي المستخدم . لكن الضوء لا يستطيع أن يتصرف كموجة وكجسيم **في آن واحد معاً**(*) .

**لقد وصف نيلس بور** N.Bohr هذه الظاهرة بأن الموجة والجسيم وجهان **متتامان** complementary لحقيقة واحدة ، حقيقة تقع خارج إمكانيات تصوراتنا . وفي مقابل ذلك تتجلى الإلكترونات والبروتونات ، وسواها من الجسيمات الذرية وما دونها ، بشكل موجات في بعض الظروف . وعلى هذا فإن للفوتون عموماً شأناً لا يختلف عن شأن هذه الكائنات ويمكن أن يوضع معها في مصافّ الأنواع الجسيمية .

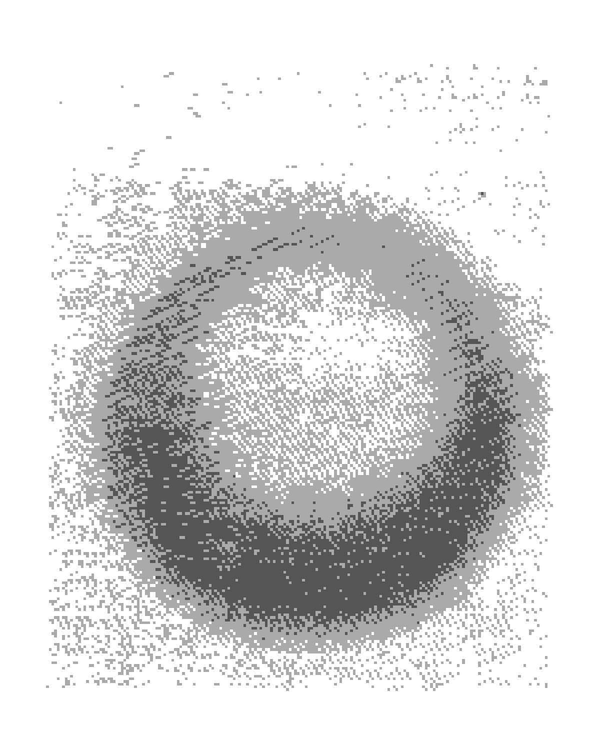
---

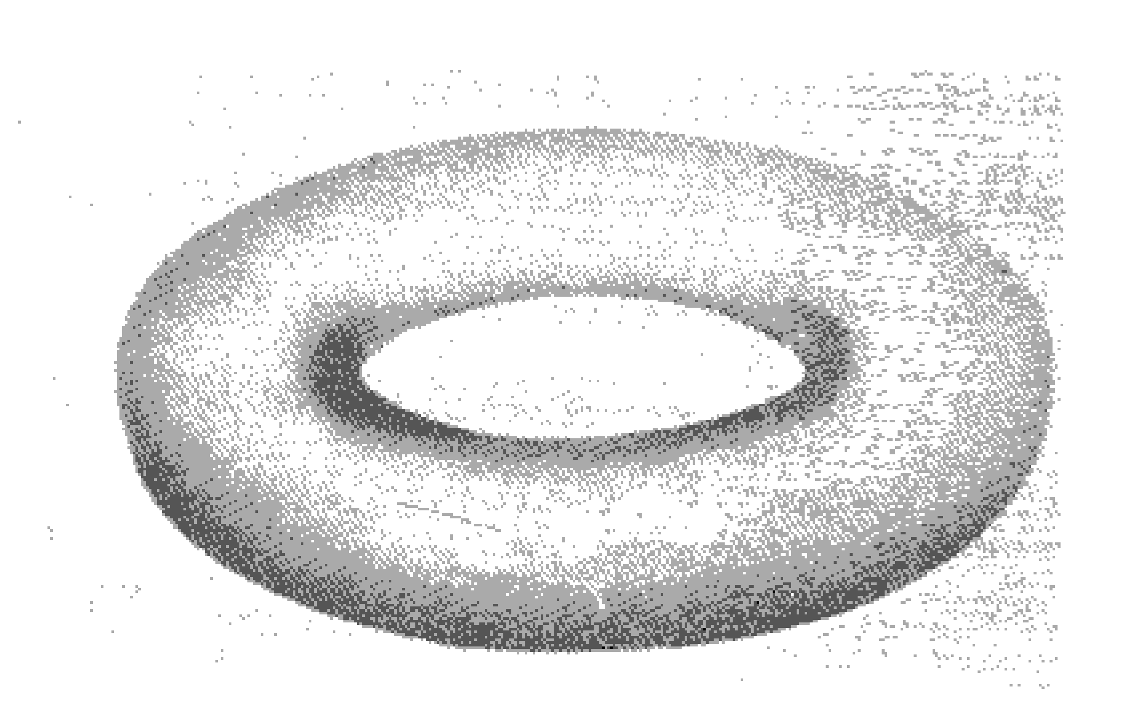
(*) أي تجربة واحدة ، فهو إما موجة وإما جسيم ، حسب هدف التجربة . (المترجم)

إن المثنوية، موجة/جسيم، وهي قطب الرحى في نظرية الكم، تتضمن أن بعض الأوصاف التي يراد نسبها إلى كائن من مكنونات الذرة لا يمكن تحديدها جيداً. فالموجة الكمومية المنتظمة، مثلاً، ذات اندفاع momentum محدد، لكن امتدادها في الفضاء يجعل من الصعب تحديد موضعها بدقة. وإذا أردنا، من جهة أخرى، تناول إلكترون، أو فوتون، بما يتيح له أن يُظهر موضعه (باستخدام شاشة تتحسس بالضوء، مثلاً) فإن اندفاعه يصبح عصيّاً على التعيين الدقيق. وعلى هذا يمكن للمرء أن يُجري قياساً لتعيين الاندفاع وقياساً آخر لتعيين الموضع، لكن من غير الممكن تعيين الاثنين في عملية واحدة: إن الانسان عاجز عن قياس موضع الكائن الكمومي واندفاعه في آن واحد. ونتيجة ذلك أن نشاط الجملة الكمومية نشاط ضبابي يُبدي غموضاً لا يمكن استجلاؤه؛ وهذه الضبابية تتمثل بمبدأ مشهور ندين به لفيرنر هايزنبرغ W.Heisenberg ويسمى **مبدأ الارتياب** uncertainty principle.

وهناك طريقة للتعبير عن هذا المبدأ تقول بأن كل المقادير تعاني، لدى قياسها، تفاوتات «تغلّف» قيمها ولا يمكن التنبؤ بهذه القيم. والمقادير الفيزيائية كلها مصنفة في أزواج، كالموضع والاندفاع، تنطوي على تعارض في عملية القياس بين الزوجين. فإذا رمزنا، مثلاً، بـ $\Delta x$ للارتياب في الموضع وبـ $\Delta p$ للارتياب بالاندفاع، فإن مبدأ الارتياب يقضي بأن الجداء $\Delta x \Delta p$ لا يمكن أن يقل عن ثابتة تسمى ثابتة بلانك يُرمز لها بـ h. فهذه الثابتة هي إذن «كمُّ» الضبابية في الطبيعة؛ وقيمتها الصغيرة جداً ($6,63 \times 10^{-34}$ جول ثانية) تنبئ بأن الضبابية الكمومية لا تتجلى بوضوح إلا في مملكة الذرات وما دونها صغراً، لكنها، من حيث المبدأ، تنطبق على كل المنظومات.

**شكل ٥**. يهتم علم التوبولوجيا بدراسة كيفية تواصل الخطوط والسطوح فيما بينها. فتوبولوجية الكرة (اليسار) تختلف عن توبولوجية السوار (اليمين) لأن السوار يحوي ثقباً.





والزوجان الآخران اللذان يحكمهما ، في عملية القياس ، مبدأ الارتياب هما الطاقة E والزمن t . وعندئذ لا يمكن أن يقل الجداء ΔEΔt عن ħ . وهذان الوجهان لمبدأ الارتياب يقضيان بأن تصغير الارتياب في الموضع إلى أبعد الحدود يجعل الارتياب في الاندفاع كبيراً جداً ، وأن بالإمكان تصغير الارتياب في الزمن على حساب ازدياد الارتياب في الطاقة ؛ وهذا ، في عدة أحوال ، يكافئ القول بأن تمييز الفواصل المكانية الصغيرة جداً لبنية ما ، في أثناء زمن قصير جداً ، يتيح للاندفاع والطاقة أن يأخذا قيماً كبيرة جداً . وهكذا تُعلِّق النظرية الكمومية سُلَّما طاقياً واندفاعياً طبيعياً بكل فاصل زماني ومكاني . ومن ذلك ينتج أنه كلما كانت المنطقة التي يريد الفيزيائي تفحصها صغيرة كانت الطاقة (ومن ثم الاندفاع) اللازمة لذلك كبيرة . ولهذا السبب يحتاج فحص البنى الدقيقة إلى مسرِّعات جسيمية ضخمة . زد على ذلك أن أية نظرية في أعمق مستويات بنية المادة ، مما يحتاج إلى تمييز أصغر المسافات ، تتطلب أعظم الطاقات . وهكذا توجَّه عناية خاصة إلى صفات أمثال هذه النظرية في الطاقات العالية .

وبسبب ما لا يمكن تحاشيه من ارتيابات لاصقة بالمنظومات الكمومية ، تفشل قوانين نيوتن الميكانيكية (ولو أُخذت المفعولات النسبوية بالحسبان) في حال جسيمات كالإلكترونات ، ويجب إبدالها بميكانيك كمومي جديد برمته . وقد تم هذا على أيدي هايزنبرغ وشرودنغر Schrodinger وسواهما في عشرينيات هذا القرن . وعلى غرار ذلك يجب إبدال معادلات الحقول الدينامية ، كمعادلات مكسويل بخصوص الحقل الكهرطيسي ، بنظرية حقلية جديدة ؛ وهذا ما بدأ في الثلاثينيات .

إن الجسيمات دون الذرية ذات سرعات قريبة من سرعة الضوء في معظم الظروف ، وهذا يستوجب أن تكون أوصافها الكمومية منسجمة مع نظرية النسبية الخاصة . وقد تم هذا التطوير في ميكانيك الكم ، عام ١٩٢٩ ، على يدي بول ديراك P.Dirac الذي قادت معالجته النسبوية إلى نبوءة صادقة بوجود مادة مضادة antimatter . ثم ، عندما تُعالَج الحقول (كالحقل الكهرطيسي) بنظرية الكم ، يمكن الحصول على نظرية متماسكة رياضياً ، إذا صيغت بشكل نسبوي . ومع ذلك اعترضت النظرية صعوبات رياضية قاسية ، ولم يمكن بناء نظرية حقل نسبوية كمومية ناجحة ، تدعى اليوم الالكتروديناميك الكمومي ، إلا بعد الحرب العالمية الثانية . ويعترف الجميع بأن كل المحاولات ، في سبيل بناء نظرية أساسية في الظواهر الفيزيائية ، يجب أن تُرضي متطلبات نظرية النسبية الخاصة ونظرية الكم على حد سواء .

## ١ ــ ٥ . دنيا الجسيمات دون الذرية

إن عدد الجسيمات دون الذرية المعروفة يبلغ المئات . فالإلكترون والبروتون والنترون ليست سوى ثلاثة أفراد من ذلك الحشد الجسيمي . أما الأخريات فقد تم اكتشافها في الأشعة الكونية أو تصنيعها في المسرِّعات الجسيمية من خلال تصادمات عنيفة بين جسيمات عالية الطاقة جداً . وهي كلها ، باستثناء حفنة منها ، قلقة جداً وتتفكك ، في جزء زهيد من الثانية الزمنية ، إلى جسيمات أخرى .

إن الأفراد التي تنتمي إلى جنس جسيمي واحد متطابقة ؛ إذ يستحيل التمييز بين إلكترون وآخر مثلاً . زد على ذلك أن لكل جنس جسيمي نديداً جسيمياً من المادة المضادة ذا صفات مميِّزة معكوسة ، باستثناء قيمة الكتلة . فالجسيم المضاد للإلكترون ، ذي الشحنة السالبة الثابتة كما نعلم ، جسيم ذو شحنة موجبة مساوية ، معروف باسم البوزترون .

تمتاز الجسيمات بمجموعة من الخصائص الفيزيائية ، نذكر من أهمها الكتلة والشحنة الكهربائية . ولسبب عميق ، ما نزال نجهله ، تأتي الشحنة الكهربائية ، لكل الجسيمات المعروفة ، أضعافاً بسيطة من وحدة أساسية محمولة على الإلكترون . لكن كتل الجسيمات المختلفة لا تنبئ عن وجود أية علاقة بسيطة فيما بينها .

وللجسيمات دون الذرية مِيْزة أساسية هامة تتمثل في سَبِيْنها spin الأصيل . إذ إن منها جسيمات عديدة ذات نوع من الدوران الداخلي يمكن أن يُعتبر في بعض المناسبات على غرار جسم يدور حول محوره . أما الواقع فالسبين خاصية ميكانيكية كمومية لا شبيه لها في الميكانيك غير الكمومي . ولإعطاء مثال عن أسلوب اختلاف السبين الأصيل عن الحركة الدوامية العادية لجسم كالأرض مثلاً ، نفحص مسألة قيمة الاندفاع الزاوي(*) . فالاندفاع الزاوي لجسم محسوس يمكنه أن يأخذ أية قيمة من مجال مستمر . أما في حال الجسيم دون الذري فالعزم الزاوي يأخذ قيماً كمومية ( متقطعة ) ، أي إن سبين الجسيم يأخذ دوماً قيماً هي أضعاف صحيحة ( غير كسرية ) من وحدة قيمتها $\frac{1}{2}\frac{h}{2\pi}$ ، حيث h هي ثابتة بلانك ، وغالباً ما نُسقط من قيمة السبين

(*) يسمى أيضاً العزم الحركي أو العزم الزاوي ، وهو جداء الاندفاع الخطي للجسيم ببعد الاندفاع عن محور الدوران .
(المترجم)

ذكر المقدار الثابت $\frac{h}{2\pi}$ فنقول عن الجسيم الذي قيمة سبينه $\frac{h}{2\pi}$ $\frac{1}{2}$ : إن سبينه يساوي $\frac{1}{2}$ . فنقول إن سبين الإلكترون يساوي $\frac{1}{2}$ ، وسبين الفوتون يساوي 1 ، وسبين الجسيم Ω يساوي $\frac{3}{2}$ ، وهكذا .

وهناك غرائب أخرى في مجال الخصائص الهندسية للسبين الأصيل. فالجسيم العادي الدوّام حول محوره يعود ، بعد أن يدور بزاوية 360° ، إلى وضعه الأسبق . لكن الجسيم دون الذري الذي سبينه $\frac{1}{2}$ لا يفعل ذلك ، بل يتخذ بعد تدويره بـ 360° حالة كمومية ذات خصائص فيزيائية قياسية مخالفة . ولإعادته إلى حالته البدئية يجب تدويره بـ 360° أخرى . وبتعبير آخر نقول : إن عودة الجسيم الذي سبينه $\frac{1}{2}$ ، إلى حالته التي انطلق منها ، تستدعي تدويراً يساوي ضعفي ما يستدعيه الجسم العادي . فكأن الجسيم الذي سبينه $\frac{1}{2}$ يرى عالماً أكبر مما نرى . أو قل إن الفضاء الذي نراه ، نحن ، نسخةٌ مطوية على نفسها من الفضاء الذي يراه الجسيم . فما يبدو لنا نسختين متطابقتين من العالم ، كل منهما بعد تدويره بـ 360° ، يراه هذا الجسيم عالمين مختلفين . وبصريح الكلام : إن هندسة الفضاء مختلفة أساسياً ، وبشكل يكاد لا يدركه الفهم ، بالنسبة للجسيم الذي سبينه $\frac{1}{2}$ .

ينتج من ذلك أن القيمة الدقيقة لسبين جسيم تؤدي أيضاً دوراً مهماً في تعيين خصائصه الفيزيائية . فالجسيمات الموهوبة سبيناً مساوياً عدداً زوجياً من وحدات السبين ( من $\frac{h}{2\pi}$ $\frac{1}{2}$ ) تتصرف بشكل يخالف تماماً تصرف الجسيمات التي سبينها عدد فردي من تلك الوحدات . وتسمى الأولى **بوزونات** bosons ، أما الثانية فتسمى فِرميونات fermions . والفرميونات وحدها تخضع لمبدأ **الانتفاء** exclusion المنسوب إلى باولي Pauli والذي يقول باستحالة أن يحتل فرميونان حالة كمومية واحدة . لكن هذا القيد لا يكبل البوزونات .

إن اللبنات في بناء المادة يمكن أن تقسم إلى صنفين متمايزين آخرين . تدعى جسيمات الصنف الأول **لبتونات** leptons ، وتعني « الخفيفات » ، وأكثرها شيوعاً الإلكترون . ومنها أيضاً جسيم قلق ، اسمه الميون **muon** كتلته 206 أضعاف من كتلة الإلكترون . والميونات قلقة جداً وتتفكك ، في غضون مكروثانيتين ، إلى إلكترونات . ومنها كذلك نسخة أخرى عن الإلكترون ، اسمها **التاوون** tauon ، أثقل بكثير ؛ وقد حدث اكتشافه في السبعينيات ؛ وهو أيضاً قلق جداً .

وبالإضافة إلى اللبتونات الثلاثة المشحونة يوجد ثلاثة (على الأرجح) لبتونات غير مشحونة يضمها اسم واحد هو **النترينوهات** neutrions. إن كل فرد من هذه النترينوهات يشاركه في سلوكه واحد من اللبتونات الثلاثة المشحونة؛ فلدينا إذن النترينو الإلكتروني والنترينو الميوني، وعلى ما يُعتقد، النترينو التاوي (وهذا النوع لم يُكتشف بعد). وكان المفترض، لفترة طويلة، أن النترينوهات عديمة الكتلة وأنها تسير بسرعة الضوء. ولئن كانت كتلة النترينو الإلكتروني صغيرة جداً بالتأكيد، إلا أننا لا نرى أسباباً نظرية وجيهة لانعدام كتل النترينوهات. ولا يعلم أحد حتى اليوم كتلها بالضبط.

إن هذه اللبتونات الستة فرميونات، سبينها $\frac{1}{2}$. وهي تتميز بأنها ذات قوة تفاعل ضعيفة نسبياً: فهي لا تسهم في التفاعلات النووية. لكن جسيمات النواة تتفاعل بشدة فيما بينها. ويوجد أيضاً عدة عشرات من الجسيمات النووية المشاركة بالإضافة إلى البروتون والنترون. ومجمل الجسيمات النووية، وما ينجم عن التفاعلات النووية من جسيمات، تسمى **هَدرونات** hadrons.

والهدرونات أثقل عموماً بكثير من اللبتونات؛ فالبروتون، مثلاً، أثقل من الإلكترون بـ 1836 مرة. وأثقل الهدرونات فرميونات غالباً. وقد أُعطيت الهدرونات الفرميونية اسماً جماعياً هو **الباريونات** baryons، وتعني «الثقيلات». أما الهدرونات البوزونية فتسمى **ميزونات** mesons، وتعني «المتوسطات». النترون والبروتون باريونان سبين كل منهما $\frac{1}{2}$. وأخف الميزونات هو البيون **pion** وسبينه معدوم. وفي الجدول ١ نورد أكثر الهدرونات شيوعاً، ومعظمها معروفة بأسمائها اليونانية. وما من هدرون مستقر سوى البروتون (وربما كان قلقاً هو الآخر ـــ انظر الفقرة ١ ـــ ١٠). أما الهدرونات الأخرى فتتفكك إلى هدرونات أخف، أو إلى لبتونات.

إن كثرة الهدرونات توحي بأنها ليست جسيمات عنصرية (لبنات بنية المادة)، بل أجسام مركبة ذات أجزاء داخلية، وذلك بخلاف اللبتونات، التي تُعد غالباً أساسية. وفي أوائل الستينيات اقترح غيل ـــ مان Gell-Mann وزوايغ Zweig فكرة أن الهدرونات مصنوعة من مركّبات أصغر تسمى **كواركات** quarks. والنظرية الكواركية موطّدة اليوم جيداً.

والكواركات، كاللبتونات، تأتي (على الأرجح) على ستة أنواع قضت النزوة أن تسمى نكهات flavours. وللنكهات أسماء اعتباطية ما أنزل الله بها من سلطان هي: علوية **up**، سفلية **down**، غريبة **strange**، مفتونة **charm**، ذُروية **top** (أو صِدقية **truth**)، قعرية **bottom** (أو جميلة **beauty**). وسبين الكواركات، كاللبتونات، يساوي $\frac{1}{2}$، فهي فرميونات.

جدول ١ : بعض الهدرونات الشائعة

| الاسم | الرمز | الكتلة | الشحنة | السبين | العمر |
|---|---|---|---|---|---|
| بيون | $\pi^+ \pi^-$ | 139.57 | +1 −1 | 0 | $2.6 \times 10^{-8}$ |
| | $\pi^0$ | 134.96 | 0 | 0 | $0.8 \times 10^{-16}$ |
| كاؤون | $K^+ K^-$ | 493.67 | +1 −1 | 0 | $1.2 \times 10^{-8}$ |
| | $K^0 \bar{K}^0$ | 497.67 | 0 | 0 | $0.9 \times 10^{-10}$ |
| إيتا | $\eta$ | 548.8 | 0 | 0 | $2.5 \times 10^{-19}$ |
| بروتون | $p \bar{p}$ | 938.28 | +1 −1 | $\frac{1}{2}$ | $>10^{39}$ |
| نترون | $n \bar{n}$ | 939.57 | 0 | $\frac{1}{2}$ | 898 |
| لمدا | $\Lambda \bar{\Lambda}$ | 1115.60 | 0 | $\frac{1}{2}$ | $2.6 \times 10^{-10}$ |
| | $\Sigma^+ \bar{\Sigma}^+$ | 1189.36 | +1 −1 | $\frac{1}{2}$ | $0.8 \times 10^{-10}$ |
| سيغما | $\Sigma^0 \bar{\Sigma}^0$ | 1192.46 | 0 | $\frac{1}{2}$ | $5.8 \times 10^{-20}$ |
| | $\Sigma^- \bar{\Sigma}^-$ | 1197.34 | -1 +1 | $\frac{1}{2}$ | $1.5 \times 10^{-20}$ |
| كسي | $\Xi^0 \bar{\Xi}^0$ | 1314.9 | 0 | $\frac{1}{2}$ | $2.9 \times 10^{-10}$ |
| | $\Xi^- \bar{\Xi}^-$ | 1321.3 | -1 +1 | $\frac{1}{2}$ | $1.6 \times 10^{-10}$ |
| أوميغا | $\Omega^- \bar{\Omega}^-$ | 1672.5 | -1 +1 | $\frac{1}{2}$ | $0.8 \times 10^{-10}$ |

وحدة الكتلة : ماف ( مليون إلكترون فولت ) . الشحنة بوحدة شحنة البروتون . العمر بالثواني . الرمز الذي فوقه خط يمثل الجسيم المضاد .

تتحد الكواركات معاً لصنع الهدرونات بطريقتين مختلفتين ، تنطوي إحداهما على اتحاد ثلاثة كوراكات . وبموجب ميكانيك الكم يجب على سبينات الكواركات أن تكون متوازية ، إما متفقة في الاتجاه أو متضادة فيما بينها ( يقال متوازية parallel أو متضادة التوازي antiparallel ) ، وبذلك ينضم ثلاثة كواركات سبينها $\frac{1}{2}$ فتعطي جسيماً سبينه $\frac{1}{2}$ أو $\frac{3}{2}$ ، وتلك هي الباريونات . وبحسب نكهات الكواركات المتحدة تنشأ كل الباريونات المعروفة . فالبروتون ، مثلاً ، مصنوع من

كواركين علويين وكوارك واحد سفلي ( uud ) ، والنترون مصنوع من كواركين سفليين وكوارك واحد علوي ( ddu ) ، والجسيم Ω مصنوع من ثلاثة كواركات غريبة ( sss ) .

وفي طريقة أخرى لاتحاد الكواركات ينضم كوارك وكوارك مضاد معاً . وعندئذ تقضي قواعد ميكانيك الكمّ بأن يكون سبين المضمومة مساوياً 0 أو 1 ، أي أن تكون بوزوناً دوماً . وهنا نحصل على الميزونات . ولما كانت الميزونات لا تحوي سوى كواركين ، في حين تحوي الباريونات ثلاثة كواركات ، تكون الميزونات أخف من الباريونات عموماً . لكن كتلة الكوارك المفتون ، مثلاً ، أكبر بكثير من كتلة العلوي ومن كتلة السفلي ، مما يجعل الميزونات المصنوعة من زوجي كوارك مفتون وكوارك مضاد أثقل بكثير جداً من مجموع كتل الكواركات الثلاثة في البروتون .

لما كانت الباريونات مصنوعة من كواركات ثلاثة ، فلا بدّ للكواركات من أن تحمل شحنات كهربائية من إحدى القيمتين : $\frac{1}{3}$ أو $\frac{2}{3}$ من الوحدة الأساسية (أي من شحنة البروتون ) . والشحنة الكسرية من هذا القبيل يجب أن تجعل الكوارك الفرد المنفصل يبدو مثل جسيم « عليل » إذا أمكن رصده تجريبياً . لكن من شبه المؤكد أن الكواركات لا يمكن عزلها . ولدينا حجج قوية على أنها تظل على الدوام حبيسة ضمن الهدورنات . وقد أخفقت كل محاولات تحطيم الهدرونات إلى كواركاتها بالرجم العنيف . ويبدو ، مما نعرفه عن القوة بين الكواركات ( انظر الفقرة التالية ) ، أننا نحتاجها مضمومة كلياً .

ومع أن الفيزيائيين ما زالوا عاجزين عن دراسة كواركات معزولة ، يوجد أدلة مقنعة على وجودها ضمن الهدرونات ،وهي أدلة مستمدة من تجارب رجم الجسيمات النووية بإلكترونات . فقد كشف أسلوب تبعثر هذه الإلكترونات بعد الرجم وجود ثلاثة كتل كبيرة مرصوصة ضمن كل جسيم نووي ، وذلك من خلال حصول « انبعاثات » هدرونية في تجارب الرجم ذات الطاقة العالية وفي سواها .

. هذا وإن معظم الفيزيائيين مقتنعون بفرضية أن الكواركات واللبتونات هي حجيرات الأساس في أعمق مستويات كل بنية ؛ أي إنها الجسيمات الأساسية التي صنعت منها كل المادة . لكن من الممكن طبعاً تصور أن هذه الجسيمات مصنوعة هي الأخرى من كائنات أصغر منها . والواقع أن بعض الفيزيائيين يشعرون بأن مجموع عددي الكواركات واللبتونات كبير لدرجة محرجة . ( بالاضافة إلى النكهات الكواركية الست ، تأتي كل نكهة على ثلاثة « ألوان » ، مما يجعل مجموع الأنواع الكواركية ثمانية عشر . ) لكن القبول بأن الكواركات واللبتونات أساسية بالفعل ، يطرح مسألة الأشكال التي تتخذها .

كي يكون الكائن أساسياً يجب أن لا يُستطاع «تمزيقه» ولا تحويله إلى شيء آخر بإجراء داخلي. ولهذا السبب تولدت القناعة، مدة طويلة، بأن الكواركات واللبتونات جسيمات نقطية غير ذات بنية داخلية بتاتاً. لكننا سنرى، في هذا الشأن، أن هناك مشاكل نظرية حادة ناجمة عن فكرة «نقطية» هذه الجسيمات؛ ويبدو معقولاً أن تكون هذه الجسيمات «الأساسية» ذات بنية من نوع ما فعلاً.

## ١ ــ ٦ . القوى الأربع

رغم ما يبدو من أن الطبيعة تنطوي، في الحياة اليومية، على تشكيلة كبيرة من أنواع القوى، يمكن في حقيقة الأمر إرجاع أية قوة إلى إحدى قوى عددها أربع فقط. أكثر هذه القوى شيوعاً هي الثقالة، وقد كانت أول قوة حظيت بنظرية رياضية منهجية، على يدي نيوتن. والثقالة وحدها قوة عالمية شاملة، أي إنها تفعل فعلها بين كل الجسيمات دون استثناء. ومنبع الثقالة كتلة الجسيم مهما كان شأنه؛ فالثقالة إذن قوة تراكم فتشتد كلما ازدادت كتلة منابعها؛ وهي، باستثناء ظروف دخيلة، تجاذبية دوماً.

يقال إن الثقالة قوة ذات «مدى طويل»، لأنها تستطيع أن تفعل فعلها على مسافات محسوسة ــ في المدى الكوني واقعياً. وسبب ذلك أن شدتها تتناقص، بازدياد المسافة، تناقصاً بطيئاً نسبياً ــ وبدقيق العبارة تتناقص متناسبة مع مقلوب مربع المسافة لدى ازديادها. فالقوة الثقالية بين إلكترون وبروتون، مثلاً، أضعف من القوة الكهربائية بينهما بقرابة $10^{40}$ مرة. ولهذا السبب لا يبدو أن الثقالة تؤدي دوراً مباشراً يُذكر في فيزياء الجسيمات دون الذرية. لكنها، على كل حال، واحدةٌ من القوى الأساسية الأربع في الطبيعة ولا بدّ من تدبير مكان لها في أية نظرية توحد هذه القوى كلها.

إن في الفيزياء مفهوماً هاماً في توصيف القوى كلها، هو مفهوم الحقل. كان نيوتن يفهم الثقالة بأنها «فعل عن بعد»، أي، بتعبير أوضح، أن الفعل الثقالي للجسيم يؤثر مباشرة في جسيم آخر قافزاً فوق المسافة بينهما. لكن الفيزياء الحديثة ترى أن كل جسيم منبعُ حقل قوة ــ حقل ثقالي بصدد ما نحن فيه ــ يحيط بالجسيم؛ والجسيم الآخر يعاني، من جراء وجوده في هذا الحقل، قوة متناسبة مع شدة الحقل في النقطة التي هو فيها. ويعزى تناقص شدة الثقالة بازدياد المسافة إلى تضاؤل الحقل تدريجياً لدى الابتعاد عن منبعه.

وفي عام ١٩١٥ استبدل أينشتاين بنظرية نيوتن الثقالية نظريته النسبوية العامة. وفي هذه النظرية رأينا، في الفقرة ١ ــ ٣، أن الحقل الثقالي يُفسَّر بتشوه الزمكان أو انحنائه، أي إنه مفعول من طبيعة هندسية صافية. وهذا التفسير يعزل الثقالة عن القوى الثلاث الأخرى.

وفي المحل الثاني، بعد نظرية نيوتن الثقالية، ظهرت القوة الكهرطيسية التي حظيت بأساس نظري. فقد دُرست القوتان، الكهربائية والمغنطيسية، في التجارب المخبرية بوضوح وكانتا معروفتين منذ القديم. لكن الرابطة البنيوية بين الكهرباء والمغنطيسية لم تُكتشف إلا في القرن التاسع عشر بفضل أعمال فارادي **Faraday** وسواه. عندئذ نجح مكسويل في صوغ مجموعة معادلات وحَّدت الاثنتين في نظرية «كهرطيسية» واحدة؛ فخطا بذلك أول خطوة على طريق نظرية توحِّد قوى الطبيعة.

إن منبع الحقل الكهرطيسي هو الشحنةُ الكهربائية. لكن الجسيمات ليست كلها ذات شحنة كهربائية؛ فالقوة الكهرطيسية، بخلاف الثقالة، ليست قوة عالمية، لكنها تشبه الثقالة في طول مداها ــ القوتان، الكهربائية والمغنطيسية، تخضعان، كالقوة الثقالية، لقانون التربيع العكسي. بيد أن القوة الكهرطيسية، كما ذكرنا، أشد بكثير جداً من الثقالة؛ لكن وجود نوعين، موجب وسالب، من الشحنات الكهربائية يجعل مفعوليهما الكهرطيسيين متفانيين عموماً في الأجسام المحسوسة؛ أي إن القوى الكهرطيسية لا تتراكم بما يزيد في شدتها؛ بل يُعدِّل بعضها بعضاً. ولهذا السبب كانت الثقالة أحرى من القوة الكهرطيسية بالسيادة في المدى الكوني الواسع رغم التفوق الكبير المتأصل في الكهرطيسية.

أما القوتان الأساسيتان الأخريان فلا يُحَسُّ بهما في الحياة اليومية لأن مداهما لا يتعدى الأبعاد دون الذرية. أولى هاتين القوتين، وتدعى النووية الشديدة، مسؤولة عن ترابط البروتونات والنترونات معاً في نوى الذرات. وهذه القوة تتلاشى تماماً بعد مسافة من رتبة $10^{-15}$ متراً. وقصر مداها يميزها تمييزاً حاداً عن القوتين، الثقالية والكهرطيسية. وليست البروتونات والنترونات وحدها هي التي تُحسُّ بالقوة الشديدة، بل الهدرونات كلها. لكن اللبتونات لا تشعر بها.

إن شكل القوة بين الهدرونات معقد جداً، لأن الهدرونات ليست جسيمات أولية (عنصرية) بل مجموعات كواركات، وأن القوة بين الكواركات هي التفاعل الأساسي. وهذه القوة تشبه، في جوهرها، القوة الكهرطيسية رغم أنها أشد منها بكثير. وهذا التعقيد ناشئ عن أن القوة الشديدة، بخلاف القوة الكهرطيسية التي هي بين جسمين، مسؤولة عن تماسك ثلاثة كواركات معاً في الباريونات. وهذا يتطلب معالجة أكثر تعقيداً لمفهوم الشحنة. فبدلاً من النوع الواحد

للتفاعل بين الشحنات الكهربائية يوجد هنا ثلاثة أنواع من «الشحنات» من أجل القوة الشديدة . وهذه المنابع ، المعروفة باسم «الألوان» ، أُعطيت الألقاب الاعتباطية : حمراء ، خضراء ، زرقاء .

أما آخر القوى الأساسية الأربع فمعروفة باسم الضعيفة . إنها تؤثر في الكواركات واللبتونات جميعاً ، وبشدة أضعف بكثير من الكهرطيسية ، لكنها أشد بكثير من الثقالة . وتتجلى القوة الضعيفة رئيسياً من خلال تدخلها في التحولات الجسيمية أكثر من ظهورها كقوة جاذبة أو دافعة مباشرة . لقد طُرحت هذه القوة في البدء لتفسير التفكك البيتاوي ، وهو ضرب من النشاط الإشعاعي تبديه بعض النوى الذرية القلقة . ونموذج هذا النشاط تحول النترون إلى بروتون وإلكترون ونترينو مضاد . وهذه العملية ، التي تقودها القوة الضعيفة ، تتمثل بتغير نكهة الكوارك ؛ ففي حال النترون ، مثلاً ، يتحول أحد كواركَيْه السفليين إلى كوارك علوي . والقوة الضعيفة قادرة على تغيير نكهة الكواركات واللبتونات كليهما . ففي حالة اللبتونات يمكن للإلكترون أن يتحول إلى نترينو ، وهكذا .

**لا تخضع النترينوهات إلا للقوة الضعيفة ( بالإضافة للثقالية طبعاً ) ، وعلى هذا فهي زاهدة جداً في التفاعل . ومعروف أن النترينو يستطيع أن يقطع عدة سنين ضوئية في رصاص صلب قبل أن يتوقف . ومع ذلك يمكن اصطياد نترينوهات كثيرة من الاندفاعات الغزيرة التي تصدر عن الكوارث التي تطرأ على النجوم وهي في النزع الأخير قبل الموت . ففي كل واحدة من مجرات هذا الكون ينفجر نجم كل بضعة عقود من السنين فيما يُعرف باسم مستعر فائق supernova . وفي القرون الماضية شهد سكان الأرض عدة انفجارات من هذا القبيل . وقد رئي آخرها في سديم ماجلّان الكبير ( وهي مجرة صغيرة قريبة منا ) في ربيع عام ١٩٨٧ وكان واضحاً من الأرض .**

يبدأ المستعر الفائق بارتصاص انهياري مفاجئ سريع لقلب النجم تحت وطأة ثقله . وفي أثناء هذا الانفجار نحو الداخل تنشأ نفثة غزيرة من النترينوهات ، وتكون كثافة المادة النجمية هائلة لدرجة أن هذه الجسيمات ـــ مع أنها « شبحية » ـــ تستطيع التأثير بشدة تكفي لنسف غلاف النجم الخارجي إلى الفضاء ، مولِّدة بذلك طبقة متوسعة من الغاز المضيء . وفي أكثر الأرصاد إثارة ، في العقد الأخير ، تم اكتشاف نفثة نترينوهات المستعر الفائق المذكور عند سطح الأرض قبل ظهور نوره ببضع ساعات .

إن مدى القوة الضعيفة قصير لدرجة بالغة . فعندما اتضحت هذه القوة أول مرة كان المظنون أن التفاعلات الضعيفة شبه نقطية ، لكن المعروف اليوم أن مداها لا يتعدى قرابة $10^{-17}$ من المتر .

## ١ ــ ٧ . الجسيمات حاملات القوى

لقد ذكرنا أن سلوك الجسيمات دون الذرية محكوم بميكانيك الكم (انظر الفقرة ١ ــ ٤). فكل أوصاف المملكة دون الذرية يجب، إذن، أن تنسجم مع هذه النظرية. ونقطة الانطلاق في ميكانيك الكم كانت فرضية بلانك القائلة بأن الضوء يخرج من منبعه رُزماً منفصلة دعيت كموماً، وتعرف اليوم باسم فوتونات. فالاضطرابات الكهرطيسية تنتشر إذن عبر الفضاء بشكل فوتونات ذات سمات شبه نقطية. وليس الفوتون كواركاً ولا لبتوناً؛ إنه أول عضو في صنف ثالث متميز من الجسيمات.

تذكر، من الفقرة ١ ــ ٥، أن الهدرونات، سواء كانت فرميونات أو بوزونات، تتألف من كواركات وأن الكوراكات فرميونات. واللبتونات فرميونات أيضاً. فالجسيمات الأساسية في الطبيعة فرميونات إذن كلها. لكن الفوتون يختلف عن كل من الكواركات واللبتونات في أنه بوزون أساسي. فسبينه يساوي الواحد فعلاً. وكتلته (السكونية تحديداً) معدومة؛ وسرعته، تعريفاً، سرعة الضوء.

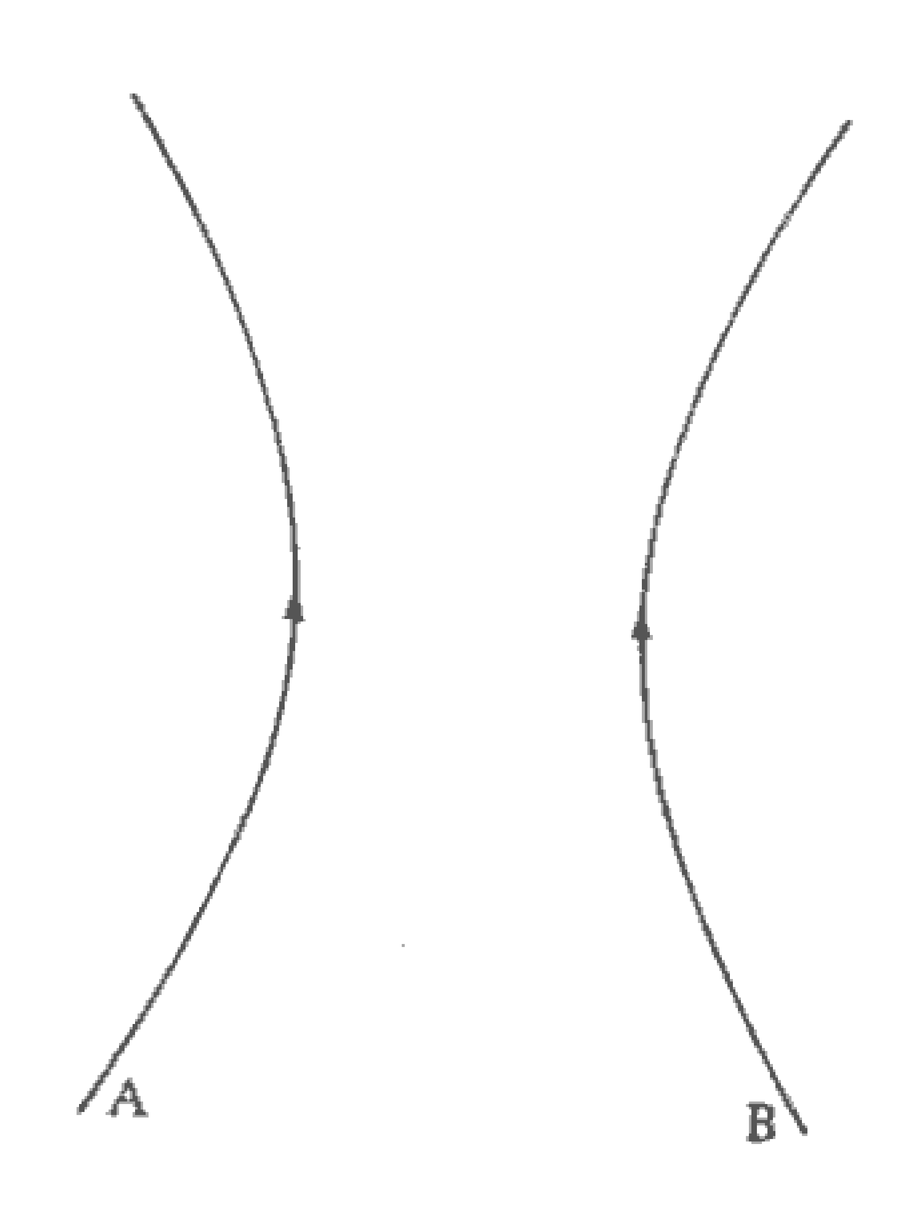
إن وجود الفوتونات يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار لدى مناقشة فعل القوة الكهرطيسية. ويُظهر الشكل ٦ جسيمين مشحونين بالكهرباء يسيران كما تهوى الصورة القديمة. أي إن الحقل الكهرطيسي للجسيم **A** يفعل في الجسيم **B**، عندما يتقاربان، بقوة مُنفِّرة تحرفه عن طريقه، كما يفعل **B** في **A** الفعل ذاته. وفي أثناء هذه العملية، المعروفة باسم **التبعثر scattering**، أو **الانتثار**، يتبادل الجسيمان قسطاً من الاندفاع، وربما من الطاقة أيضاً.

أما في النظرية الكمومية فالاندفاع والطاقة كموميان، أي إنهما لا يمكن أن يتغيرا بأسلوب الاستمرار، بل يتبادلهما الجسيمان على قيم متقطعة (كموم). وعلى هذا فإن العملية المرسومة في الشكل ٧ يجب أن تُفهم فهماً مختلفاً بعض الشيء. فبدلاً من سيل مستمر من الاندفاع والطاقة بين الجسيمين عبر الحقل الكهرطيسي يحدث التفاعل بوساطة فوتونات يتبادلانها. ويُري الشكل ٧ تبادل فوتون واحد مثَّلنا مساره بخط متموج. ولا يمكن أن نعرف اتجاه مرور الفوتون بسبب مبدأ الارتياب؛ فإصدار الفوتون وامتصاصه يحدثان ضمن برهة زمنية $\Delta t$ يشوب الارتياب قيمتها. ومن وجهة النظر هذه يعمل الفوتون عمل مرسال ينقل القوة الكهرطيسية بين الجسيمين المشحونين. ويقول الفيزيائيون إن بين الجسيمين المشحونين «**اقتراناً coupling**» بالفوتونات التي أصبحت، بهذا التفسير، مسؤولة عن التفاعل الكهرطيسي.

يمكن أن يحدث أيضاً تبادل فوتونين ، لكن إسهام هذا التبادل في مفعول الانتشار ( التبعثر ) أقل جداً من إسهام تبادل فوتون واحد . وإسهام ثلاثة فوتونات أو أربعة ... عملية أضعف شأناً ، وهكذا . والصور التي من قبيل الشكل ٧ تسمى **مخططات** فاينمان Feynman ، باسم مبتدعها رتشارد فاينمان ، وتسمى النظرية المستمدة منها هذه المخططات باسم الإلكتروديناميك الكمومي ، وقد ذكرناه في الفقرة ١ ــ ٤ . وقد برهنت حسابات الانتثار التفصيلية ، وسواها من العمليات الكهرطيسية المعتمدة على هذه الأفكار ، على أن هذه النظرية ناجحة بشكل مدهش ، وتقود إلى نتائج تتفق مع القياسات التجريبية بدقة جيدة جداً .

إن من الممكن تناول كل قوى الطبيعة الأساسية بهذه الطريقة . فكل قوة من هذه القوى محمولة على جسيم مرسال واحد أو أكثر . وفي حال الثقالة جسيم مرسال ، على غرار الفوتون ، اسمه **غرافيتون graviton ؛ وهو أيضاً بوزون عديم الكتلة لكن سبينه يساوي 2 . واقتران الغرافيتونات بالجسيمات الأخرى ضعيف لدرجة أن مفعولاته لم تُلحظ في المختبر حتى اليوم ؛ لكن وجودها يقوم** على أدلة غير مباشرة وعلى أساس من تماسك الفيزياء . ويوجد صلة مباشرة بين انعدام كتلتي الفوتون والغرافيتون وبين عِظَم مدى القوتين الكهرطيسية والثقالية .

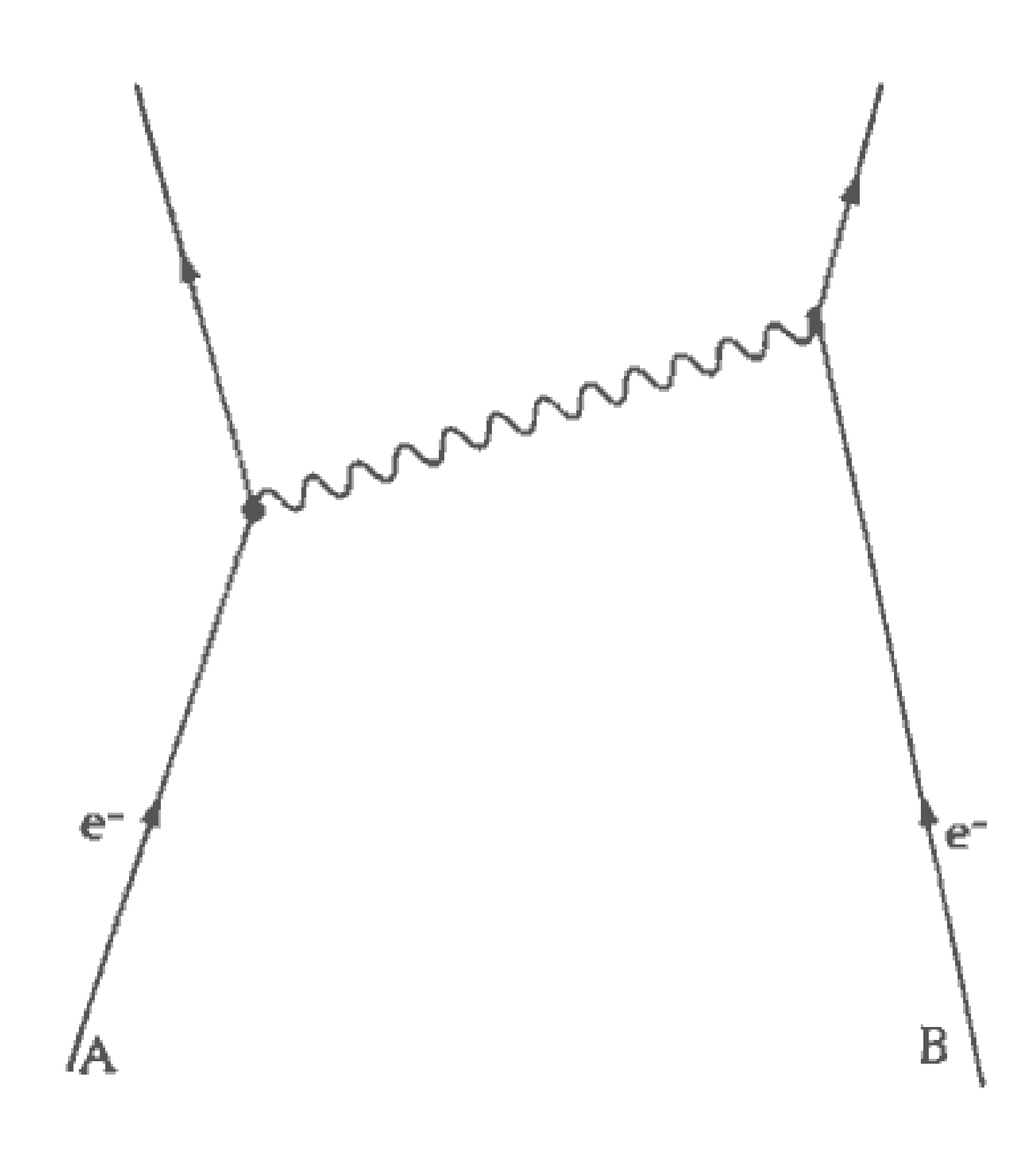
**شكل ٦ .** إن التنافر المتبادل بين شحنتين كهربائيتين متماثلتين يسبب ، في الفيزياء التقليدية ، انعطافاً يوصف بأنه انتقال استمراري للاندفاع يجعل مساري الجسيمين ينحنيان في مسيريهما .



وبين الغرافيتون والفوتون فرق هام آخر ، هو أن الفوتونات لا تقترن إلا بالجسيمات المشحونة ، في حين أن الغرافيتونات تقترن بكل الجسيمات ، بما فيها **الغرافيتونات !** وهذا يعني أن الغرافيتونات تشعر بالثقالة ، وأنها يمكن أن تتفاعل فيما بينها فتقوم بعمليات من قبيل العملية المرسومة في الشكل ٨ . ومثل هذه الشبكة التي تنسجها الغرافيتونات تدل على أن النظرية « لا خطيَّة nonlinear » ، بمعنى أن العمليات الغرافيتونية لا يمكن أن تتراكب ببساطة بعضاً فوق بعض . فالنظرية الخطية ، كالكهرطيسية ، تضمن أن الحزم الفوتونية يمكن أن تتقاطع ، مثلاً ، دون أن يحدث أي اضطراب متبادل فيها . لكن الطبيعة اللاخطية للثقالة هي السبب في معظم الصعوبة التي تعترض طريق العثور على صيغة كمومية لهذه القوة ( انظر الفقرة ١ ــ ١٢ ) .

ذكرنا أن القوة الشديدة تشبه الكهرطيسية لكن مع ثلاثة أنواع من « الشحنات » معروفة باسم الألوان . وللتلاؤم مع هذا التعقيد لا بدّ من العثور على ثمانية بوزونات مراسيل على الأقل . وكموم حقل القوة الشديدة هذه ، والمعروفة إجمالياً باسم **الغليونات** gluons ، ذات سبين يساوي 1 ، كالفوتون . لكنها تشترك مع الغرافيتون بخاصة الاقتران فيما بينها ، أي إن الغليونات ، كالكواركات ، ذات « ألوان » . ينتج من ذلك أن النظرية المستمدة منها ، الكروموديناميك

**شكل ٧** . إن قوة التنافر بين جسيمين مشحونين ، إلكترونين مثلاً ، يمكن أن تحسب على أساس أنها مفعول تبادل فوتونات بينهما .



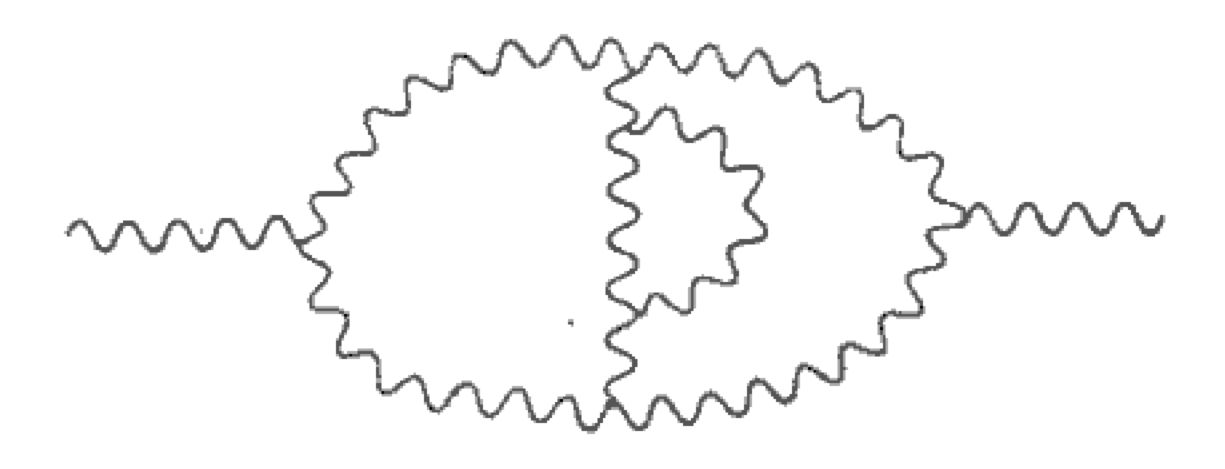
( الديناميك الصبغي ) الكمومي ، لا خطيَّة أيضاً . وعلى هذا فالقوة بين الكواركات تبدي علاقة غير عادية بالمسافة . ذلك أن معظم القوى تضعف بازدياد المسافة ، لكن القوة الغليونية تفعل العكس ؛ فهي ، في المدى القريب ( المقابل للطاقات العالية ، انظر الفقرة ١ ـــ ٤ ) تتلاشى ، لكنها تشتد عندما تبتعد الكواركات بعضاً عن بعض . ومن هذه الزاوية يوجد تشابه بين القوة الغليونية والوتر المطاط . فكأن القوة لا بدّ أن تشتد بلا حدود . وإذا كان الأمر كذلك فستظل الكواركات حبيسة إلى ما شاء الله في سجونها الهدرونية .

هذا ونذكر أخيراً أن القوة الضعيفة تمتلك ثلاثة مراسيل ، جسيمات ثلاثة رموزها $W^+$ و $W^-$ و Z . وكلها بوزونات سبينها 1 ، لكنها تختلف عن كل المراسيل الأخرى في أن كتلها غير معدومة . والواقع أن كتلها كبيرة جداً بالفعل ( زهاء 80 كتلة بروتونية في حالة W و 90 في حالة Z ) . وهذا هو السبب في القِصَر البالغ لمدى القوة الضعيفة . والجسيم Z يشبه الفوتون من كل الوجوه ، باستثناء الكتلة . لكن الجسيمين W مشحونان كهربائياً ؛ والواقع أن $W^-$ هو الجسيم المضاد لـ $W^+$ . ولكل منهما شحنة تساوي شحنة الإلكترون ، المتخذة وحدة الشحنات في فيزياء الجسيمات .

## ١ ـــ ٨ . التناظر والتناظر الفائق

إن المعالجة الجيدة لموضوع التناظر تستدعي رياضيات متقدمة تقع خارج نطاق هذا الكتاب . لكن مفاهيمه الأساسية ليست صعبة على الإدراك . ولتركيز الأفكار تأمل في بعض

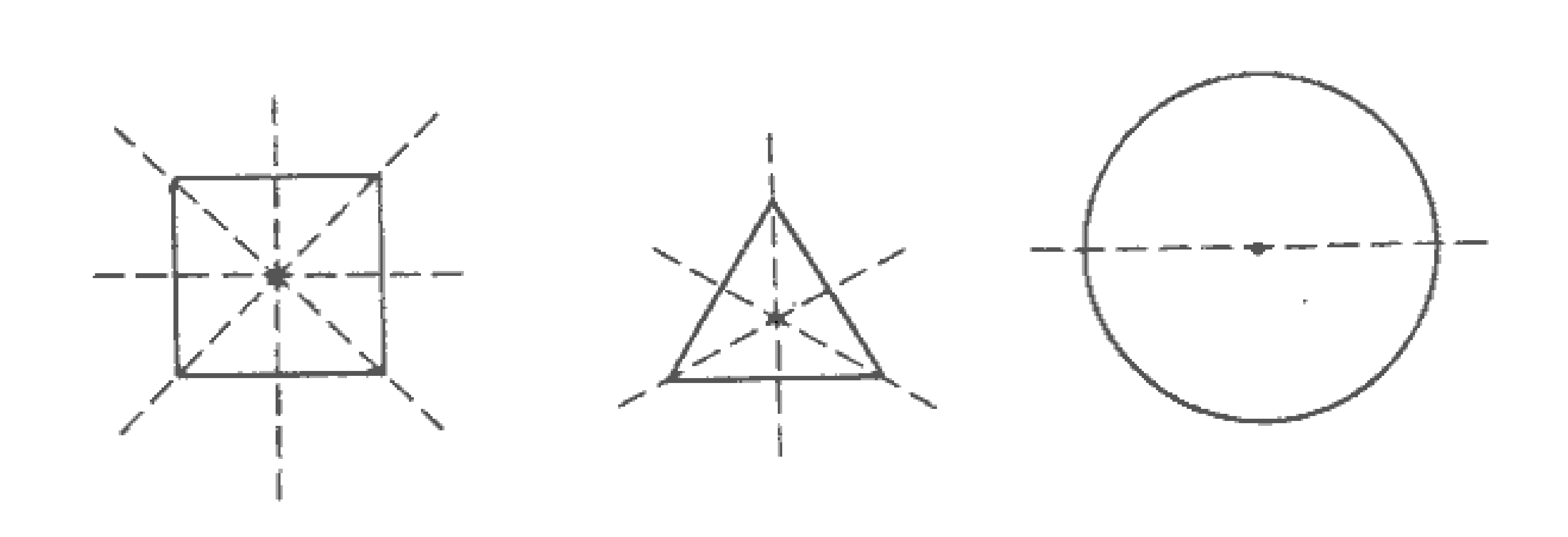
**شكل ٨ .** بما أن الثقالة « تتثاقل » فإن الغرافيتونات ( الخطوط المتموجة ) يمكن أن تتفاعل فيما بينها ، مما يؤدي إلى مخططات فاينمان المعقدة ، من النوع المرسوم هنا .



الأشكال الهندسية البسيطة : المربع ، المثلث المتساوي الأضلاع ، الدائرة ( شكل ٩ ) . فكل واحد منها غني بخصائص تناظرية تلفت النظر . ربما كان التناظر الانعكاسي ( أو المرآتي ) أوضح ما تتمتع به هذه الأشكال كلها . أي إنك إذا وضعت مرآة مستوية عمودياً على مستوى الورقة وفق الخطوط المتقطعة ( جرِّب ذلك ) ترى أن الأشكال تبقى كما هي عليه . وفي كل شكل ترى أن خيال نصفه الأيسر هو منعكِس خيال نصفه الأيمن . وبتعبير مجازي عن هذه الخاصة نقول إن هذه الأشكال تبقى صامدة ( كما هي ) إزاء الانعكاسات عن المحاور المستقيمة المتقطعة . لاحظ أنه يوجد ، في كل شكل ، عدة محاور تناظر مرآتي ( انعكاسي ) : أربعة في حال المربع ، ثلاثة في حال المثلث ، عدد لا نهائي في حال الدائرة ( أي قطر من أقطارها ) .

يمكن أن نجد في هذه الأشكال أنواعاً أخرى من التناظر . فالمثلث ، مثلاً ، يعود لينطبق على نفسه إذا دار في مستويه ، حول نقطة الوسط فيه ، بزاوية تساوي 120° أو 240° أو 360° . والمربع ينطبق على نفسه بعد تدويره حول مركزه بإحدى الزوايا الأربع : 90° أو 180° أو 270° أو 360° ؛ ويقال عندئذ إن الشكل **صامد** إزاء دورانات هي أضعاف 120° ، للمثلث ، وأضعاف 90° للمربع . أما الدائرة فصامدة إزاء أي دوران حول مركزها . فالتناظر الدوراني يأتي إذن على نوعين مختلفين : مستمر ومتقطع . فدوران الدائرة عملية تناظر مستمر تدع الشكل صامداً إزاء أي تدوير حول المركز . أما المثلث والمربع فشكلاهما صامدان إزاء دورانات ، أو تناظرات مرآتية ، متقطعة .

**شكل ٩** . نماذج من التناظرات الهندسية . إن كل شكل من هذه الأشكال يظل كما هو إذا أُخذ نظيره ( انعكس ) بالنسبة لأحد المستقيمات المتقطعة .



وللتناظر جانب آخر مهم يُستمد من السؤال عما يميز حقاً التناظر الأسمى للدائرة عن تناظر المربع مثلاً. والجواب كامن في أن المربع، كما نرى، ذو بنية أغنى من بنية الدائرة. فالدائرة، إذا قورنت بالمربع، تظهر غير ذات سمات؛ ونستطيع تخريب التناظر الدوراني فيها إذا جعلناها مفلطحة قليلاً، أو إذا وضعنا نقطة فيها. ونتيجة ذلك، في كلا الحالين، أننا أضفنا سمات جديدة وبنية. وهكذا نجد قاعدة عامة مفادها أن الجمل ذات السمات القليلة لها تناظرات أسمى.

ربما كان الفضاء الخالي أكثر النماذج تطرفاً من بين الأشياء العديمة السمات. فلا يتغير فيه شيء إذا تصورنا أننا دوَّرناه. كما أنه يبقى كما هو إذا «حركناه» (أي «سحبناه») في أي اتجاه كان. وهذا ما يمكن التعبير عنه بأن الفضاء هو نفسه في كل الاتجاهات وفي كل المواضع. (هذا صحيح فقط إذا تجاهلنا مفعولات الانحناء بالثقالة؛ وهذا يكاد يكون مباحاً دوماً في فيزياء الجسيمات.) والفضاء، فوق ذلك، صامد في الانعكاس المرآتي. وهذه الملاحظات يمكن أن تُجعل أكثر دقة إذا قلنا إن بنية الفضاء الهندسية، أي المسافات والزوايا، صامدة إزاء دورانات وانسحابات مستمرة وإزاء الانعكاسات عن أي مستو.

إن الزمن، في هذا العالم الخالي العديم السمات، يتمتع بتناظر. فأية لحظة زمنية، في فضاء خال لا يحدث فيه شيء، لا تختلف في شيء عن أية لحظة أخرى. وهذا يعني أن الزمن صامد أيضاً إزاء كل الانسحابات فيه. ويوجد أيضاً صمود إزاء الانعكاسات الزمنية، أي انقلاب الزمن. فإذا لم يحدث شيء في عالم خال، فلا مجال للتمييز فيه بين اتجاه الماضي واتجاه المستقبل.

لكن العالم الواقعي ليس خالياً تماماً، بالطبع. فهو مفعم بالحقول والجسيمات من كل نوع وجنس، ويعجُّ بنشاط كمومي. فالتناظرات الصحيحة في عالم خال تتحطم في عالم نشيط، ولكن ربما تبقى فيه تناظرات تقريبية. ففي المنظومة الشمسية، مثلاً، ليست كل الاتجاهات متكافئة: فمن الواضح أن ما نراه ونحن ننظر باتجاه الشمس مختلف جداً عما نراه إذا نظرنا بالاتجاه المعاكس. لكن هناك أسباباً عديدة تجعل الانحرافات عن التناظر الدقيق غير هامة، ويمكن تجاهلها دون محذور يُذكر.

وبصريح التعبير، لنتأمل في حال جسيم معزول يسكن في منطقة ما من الفضاء الخارجي. يمكن أن يكون هذا الجسيم كرية أو ذرة (سنتجاهل المفعولات الكمومية للزمن)، وسنفترض أن الأجسام الأخرى، كالشمس وكل الجسيمات الأخرى، أبعد من أن يكون لها تأثير كبير على تصرف الجسيم المدروس، وأن آثار حقول أية قوى أخرى مهملة. سيكون مدهشاً، في هذه الظروف، أن يقوم الجسيم فجأة بالحركة في اتجاه معين، وإلا كان علينا أن نفترض أننا غفلنا عن قوة أثرت فيه. أما في غياب أية قوة فمن المؤكد أنه لن يتحرك. وأساس هذه الثقة هو بالضبط

اعتقادنا بأن الفضاء متناظر إزاء الانسحابات . فإذا كانت أجزاء الفضاء لا تختلف بعضاً عن بعض ، فلماذا يتميز أحد المواضع عن سواه بوصول مفاجئ للجسيم إليه ؟ وفوق ذلك ، ما السبب الذي يغري الجسيم باختيار اتجاه معين يسلكه مفضِّلاً إياه على اتجاه آخر ؟

يمكن أن نجري محاكمة مماثلة على الدورانات . فنحن يجب أن لا نتوقع من جسم أن يدور فجأة على نفسه دون دافع خارجي ، إذ ما الذي يجعله يفضِّل الدوران باتجاه عقارب الساعة ، مثلاً ، على الدوران في عكس ذلك الاتجاه ؟ زد على ذلك أن محور دوران الجسم على نفسه يحدد اتجاهاً خاصاً في الفضاء . فتناظر الفضاء إزاء الدورانات يجعل الاتجاهات فيه كلها سواسية . وعلى هذا يجب أن لا نتوقع من الجسيم أن يدور على نفسه من تلقاء ذاته .

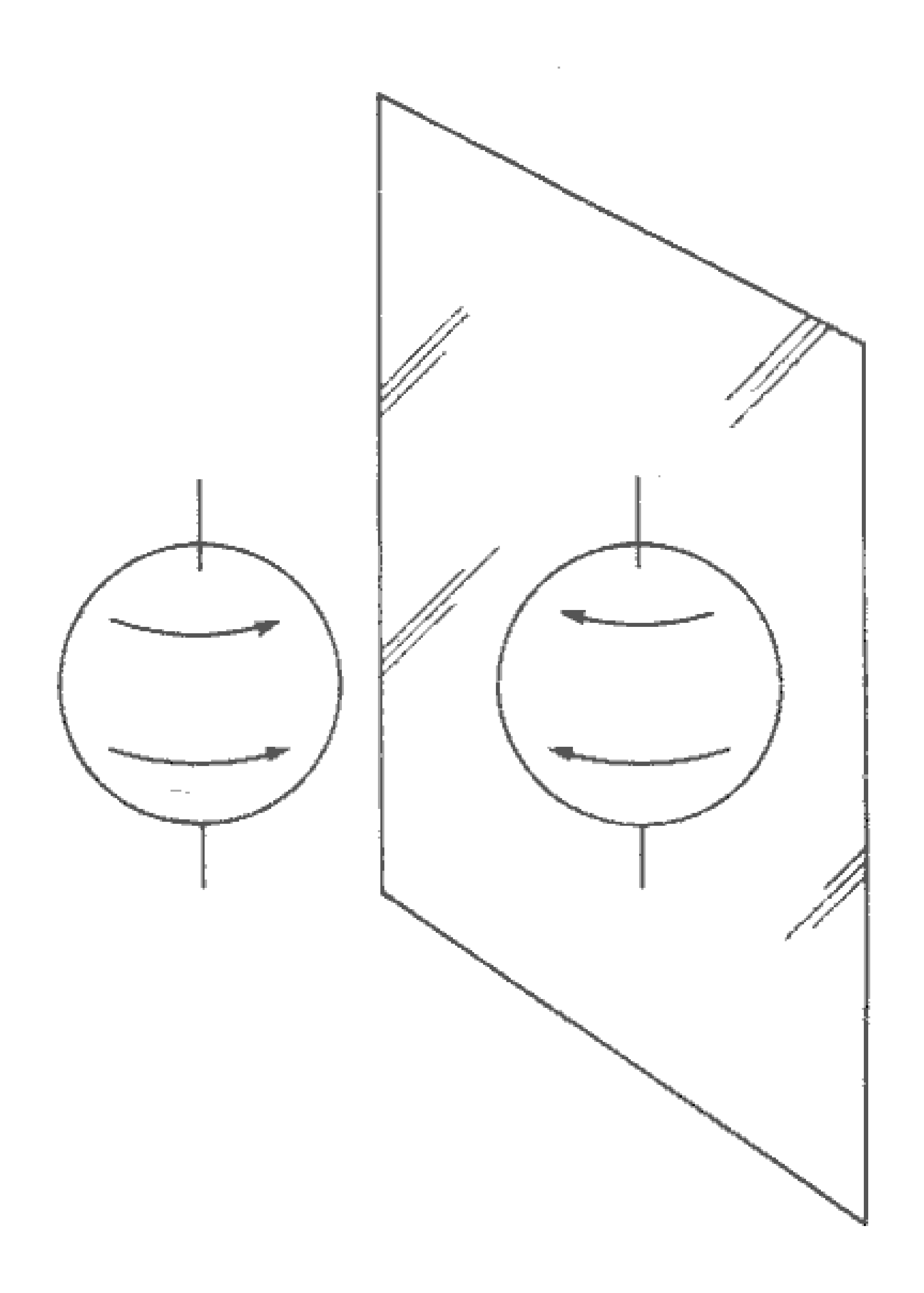
إن هذه الملاحظات يمكن أن تعطى صيغاً رياضية دقيقة وأن تُقدم صلة عميقة ووثيقة بين تناظرات الفضاء الهندسية ، من جهة ، والتصرف الدينامي ( التحريكي ) للأجسام المادية . فامتناع التغيرات التلقائية في الحركة يعادل وجود قانوني انحفاظ الاندفاع والاندفاع الزاوي . فتناظر الفضاء إزاء الانسحاب يقود مباشرة إلى قانون انحفاظ الاندفاع في حال الجسيمات ، في حين أن التناظر الدوراني ينطوي على انحفاظ الاندفاع الزاوي . زد على ذلك إمكانية البرهان على أن انحفاظ الطاقة ناجم عن تناظر الزمن إزاء الانسحاب ( لا أفضلية للحظة على سواها ) . وهكذا يتضح أن أهم قوانين الانحفاظ التي نعرفها في الفيزياء ناجمة عن الحقيقة البدائية وغير المستغرَبة ، وهي أن الفضاء الخالي والزمن ليس لهما سمات . ومن هنا تبرز مقدرة التناظر في تنظيم العالم الطبيعي .

والآن يبرز سؤال هام آخر . هل تحترم كل قوى الطبيعة آلياً تناظرات المكان والزمان الهندسية . إن نظرية مكسويل الكهرطيسية تحوي بالتأكيد كل التناظرات التي أتينا على شرحها ، وكذلك تفعل أحسن قوانيننا في الثقالة . ولفترة طويلة كان الفيزيائيون يعتقدون أن القوتين النوويتين ( الشديدة والضعيفة ) يجب أن تتمتعا بكل أنواع التناظرات الهندسية . إذ لا بدّ ، بالطبع ، أن يكون من الخطير أن تُخرق قوانين انحفاظ الطاقة والاندفاع والاندفاع الزاوي في عالم النوى الذرية وما دونه صغراً .

فكيف الموقف إذن بخصوص التناظرات الهندسية المتقطعة ؟ وكيف يمكن امتحان قوانين الفيزياء بشأنها ؟ تتمثل إحدى الطرق في تناول هذا الموضوع بالمسألة التالية : افترض أن إنساناً صوَّر فيلماً سينمائياً لظاهرة طبيعية معينة معروفة وأنه أسقط هذا الفيلم على مرآة ( أو ، كبديل آخر ، أنهِ أسقطه « بالمقلوب » من آخره إلى أوله ) . فهل يلاحظ عندئذ خدعة ، شيئاً غير مألوف ؟ أي هل يرى في المرآة عملية مستحيلة وضوحاً ؟ وعلى غرار ذلك ، هل يرى ، لدى عرض الفيلم بالمقلوب ، أية حوادث تبدو خارقة لقوانين الفيزياء ؟

افترض، كمثال بسيط، أن الفيلم قد صوَّر كرة تدور على نفسها (شكل ١٠). فمحور الدوران (أو ما سميناه محور السبين) يحدد اتجاهاً خاصاً، ونستطيع أن نرسم خطاً على طوله. فإذا شاهدنا الكرة الدوارة في المرآة نرى أن جهة دورانها (يقال أيضاً «يدويّتها handedness») أصبحت معكوسة — أي حصل تبدل (سبيني) بين جهة عقارب الساعة وعكسها. لكننا لا نرى شيئاً غريباً بشأن جهة الدوران. وإذا ضربنا صفحاً عن المرآة فإننا لا نملك أي سبب للظن بوجود مخادعة. صحيح أننا إذا فحصنا الأمر عن كثب، عندما تكون الأرض هي الكرة الدوارة، يصبح الغش واضحاً لأن الفجر سيعم القارات من الغرب إلى الشرق، لا من الشرق إلى

**شكل ١٠.** التناظر الانعكاسي — إن الكرة الدوامة تدور في عكس جهة عقارب الساعة في العالم الواقعي، وفي جهة عقارب الساعة في عالم المرآة. وهذه الحالة الثانية ليست حالة استثنائية شاذة؛ ونحن، إذا لم نشاهد حفافي المرآة، لا نستطيع أن نقول أي الكرتين هي الأصل وأيهما هي الخيال. إنهما، كلتيهما، شيئان ممكنان على حد سواء. إن الخيال المرآتي هو الذي نشاهده أيضاً إذا أسقطنا بالمقلوب فيلماً سينمائياً كان قد أخذ للكرة الأصلية في أثناء دورانها.



الغرب . لكننا نفترض أننا نناقش هنا تناظر قوانين الفيزياء ، لا تناظر أجسام كبيرة معينة في عالم الواقع . ففي عالم الجسيمات دون الذرية لا توجد « قارات » نميز بوساطتها جسيماً عن آخر ؛ فهنا لا نصادف تعقيدات طارئة .

إن مثال الكرة الدوارة يفيد أيضاً في إيضاح تناظر انعكاس الزمن ، لأن الفيلم السينمائي المعروض بالمقلوب يُظهر أيضاً انقلاباً في جهة الدوران . فمن الصور وحدها لا نستطيع أن نعرف إذا كان الفيلم معروضاً بالمقلوب أم لا — كلاهما يبدوان على درجة واحدة من المعقولية إذا كانت الكرة غير ذات سمات . وصحيح أيضاً أن من السهل ، في الحياة المألوفة ، أن نكتشف الباطل في شيء عندما يكون الشيء نفسه مصنوعاً من لقطات لبرج آخذ بالانهيار ، أو لرجل يدهن منزله ، أو ربما لماء يندلق من وعائه . لكن لا يوجد في عالم الصغريات شيء يُستغرب بخصوص انقلاب جهة السبين (دوران الشيء على نفسه) . وينطبق القول نفسه على مجريات مألوفة أخرى ، كتصادم الجسيمات وتفككها — انقلاب زمن أيٍ من هذه الظواهر لا يبدو من المعجزات . أما عندما تنعكس نشاطات عدة جسيمات معاً ، وعندئذ فقط ، فيمكن أن يداخلنا الريب في شيء ما . فتفكك النترون ، مثلاً ، إلى بروتون وإلكترون ونترينو مضاد ، يمكن أن يدعو إلى الشك إذا رئي « بالمقلوب » ، لأننا نرى عندئذ شيئاً بعيد الاحتمال جداً : لقاءً متزامناً بين بروتون وإلكترون ونترينو مضاد . ففي حال كبائر العمليات ، في المجال المحسوس جداً ، تصبح الاعتراضات على معقولية انقلاباتها الزمنية واضحة جداً .

إن التناظر في مجريات الحياة اليومية أوضحُ ما يكون في الهندسة ( انظر الشكل ٩ ) ، ولو أنه يمكن أن يحدث في مجريات أخرى . والتناظر الزمني مثال أتينا على مناقشته . على أن في الفيزياء تناظرات أخرى ليس لها صلة مباشرة بالفضاء والزمن ، وقد تبيَّن أنها من الأهمية بمكان . منها حالة بسيطة هي التناظر المتقطع لانقلاب الشحنة الكهربائية . فقد وصفنا الإلكترون والبوزترون بأنهما جسمان « مرآتيان » ، وبمعنىً ما نستطيع أن نعتبر شحنة البوزترون « خيالاً مرآتياً » لشحنة الإلكترون . وبما أن كمية الشحنة واحدة في كليهما ، فهذا يعني أن إحداهما نظير مرآتي للأخرى ، وبذلك يمكن أن نتوقع أن قوانين الفيزياء صامدة إزاء انعكاس الشحنة أيضاً .

يوجد نظرية رياضية هامة تُثبت أن قوانين الفيزياء ، المحكومة بفرضيات بسيطة جداً لا يشكُّ أحد في صحتها ، يجب أن تكون صامدة إزاء عمليات الانعكاس الفضائي والانقلاب الزمني وانعكاس الشحنة . وهذه العمليات معروفة بالرموز الحرفية P و T و C ( P : الحرف الأول من كلمة Parity ، أي مماثلة ، وفحواها : التناظر الفضائي بالانعكاس . T : الحرف الأول من

كلمة Time ، أي زمن . C : الحرف الأول من كلمة Charge ، أي شحنة ، وعلى هذا يمكن أن نرمز لعمليات الانعكاس هذه بـ م ، ز ، ش ) . وهذه النظرية معروفة باسم نظرية CPT أو ، بالعربية ، ش م ز .

في أواسط الخمسينيات لقي الفيزيائيون صعوبة في إدراك معنى بعض الظواهر التي تنطوي على تفكك هدرونات بفعل القوة الضعيفة . عندئذ قدم فيزيائيان صينيان أمريكيان ، تونغ داو لي T.D.Lee وتشين ننغ يانغ C.N.Yang ، رأياً جريئاً يقول بأن قانون انحفاظ المماثلة(*) ربما تنتهكه القوة الضعيفة . كان الجميع قبل ذلك يعتقدون أن المماثلة منحفظة حتماً في كل الأحوال ، لكن لم يخطر قط على بال أحد أن يمتحن بالتجربة صحتها في القوة الضعيفة . عندئذ أجرت صينية أمريكية أخرى ، تشيين — شيونغ وو C.S Wu ، تجربة تقليدية لدراسة الخواص الانعكاسية في مجرى التفاعل الضعيف القوة .

كانت تجربتها تتلخص بفحص اتجاه صدور جسيمات بيتا من نواة الكوبلت 60 ؛ وكان الهدف تعيين اتجاهها بالنسبة لسبين نوى الكوبلت ( جهة دورانها على نفسها ) . مخطط الموقف مرسوم في الشكل ١١ ، مع الاصطلاح بأن نوجِّه شُعّ السبين(**) ، على طول محور الدوران ، باتجاه تقدم مسمار لولبي ( برغي ) عندما ندوِّره باتجاه جهة دوران عقارب الساعة ( الجهة المعهودة ) . وقد وجدت وو أن الإلكترونات فضَّلت أن تصدر باتجاه يبتعد عن ذروة شع السبين . وإذا نظرت الآن إلى خيال هذه الظاهرة في المرآة ترى أن هذه الأفضلية معكوسة ، مما يدل بوضوح على أن للتفكك الواقعي « يدوية » فُضلى . بمعنى أنك إذا صورت التجربة على فيلم سينمائي ثم أسقطته على شاشة ونظرت إلى صورة الشاشة في مرآة ، سيقول لك الفيزيائي إن الصورة المرآتية معكوسة وإن ما تشاهده فيها ظاهرة مستحيلة . إن هذه التجربة تثبت أن المماثلة غير منحفظة في التفكك البيتاوي .

لقد تبين أن عدم انحفاظ المماثلة سمة عامة في التفاعلات الضعيفة ؛ وفي تفكك الميون السالب الشحنة ( رمزه $\mu^-$ ) ، إلى إلكترون ( $e^-$ ) ونترينو ، برهان آخر عليها . فبالرغم من أن مصير النترينو لا يمكن كشفه مباشرة ، يمكن تعيين اتجاه سبين الميون واتجاه حركة الإلكترون الصادر

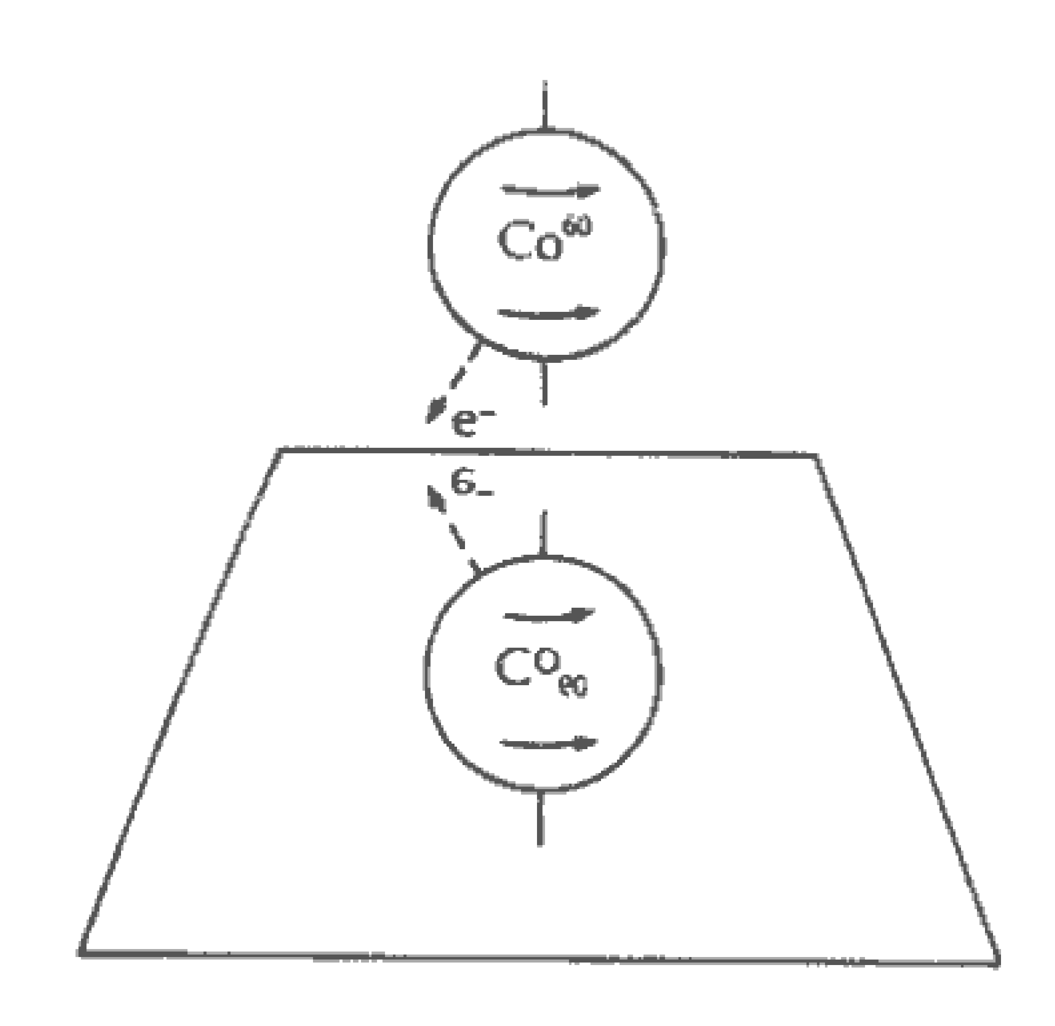
(*) أي تناظر الفضاء بالانعكاس المرآتي . ويفضل بعض النظريين العرب ، لأسباب رياضية ، كلمة زوجية على مماثلة (المترجم)

(**) شُعّ = vector . وقد فضلناها هنا على كلمة شعاع لدى أغلب الفيزيائيين ، أو كلمة متجهة لدى أغلب الرياضيين .وذلك تحاشياً لكل التباس . (المترجم)

عن هذا التفكك . وقد تبيَّن ، رغم أن الإلكترون يمكن أن يصدر عن $\mu$ في كل الاتجاهات بالنسبة لسبين الميون ، أنه يُفضِّل أن يصدر نحو الجهة التي يبدو منها الميون دائراً على نفسه باتجاه عقارب الساعة ، أكثر من نحو الجهة الأخرى .

لقد رسمنا عملية تفكك $\mu$ في الشكل ١٢ . فانظر إلى خيالها في المرآة سترى أن جهة سبين الميون قد انقلبت من جهة دورانية إلى عكسها . وسترى أن الإلكترون في الصورة يختار أن يصدر نحو الجهة التي يبدو منها خياله دائراً على نفسه في عكس اتجاه عقارب الساعة . فالمرآة تُغيِّر إذن العلاقة بين اتجاه السبين ( جهة دوران الجسيم الأصيل على نفسه ) واتجاه خروج الجسيم الصادر لكننا إذا أجرينا التحليل انطلاقاً من الجسيمات المضادة ، التي يحدث في عالمها أن يتفكك ميون موجب ( $\mu^+$ ) إلى بوزترون ( $e^+$ ) ونترينو مضاد ، يتبيَّن أن النتيجة التجريبية معكوسة ، أي إن التفكك يحدث كما نرى في الصورة المرآتية من الشكل ١٢ . زد على ذلك أن هذا الانقلاب كلي ، أي أنه ينطوي على نفس الدرجة من « الانقلابية » ولكن في الاتجاه المعاكس . إن هذه النتيجة تتفق مع التناظر بين المادة والمادة المضادة . فهي تعني أن القوانين التي تحكم تفكك الميون صامدة إزاء مضمومة العمليتين : انقلاب المماثلة م ( P ) وانقلاب الشحنة ش ( C ) ( العملية التي تحول $\mu^-$

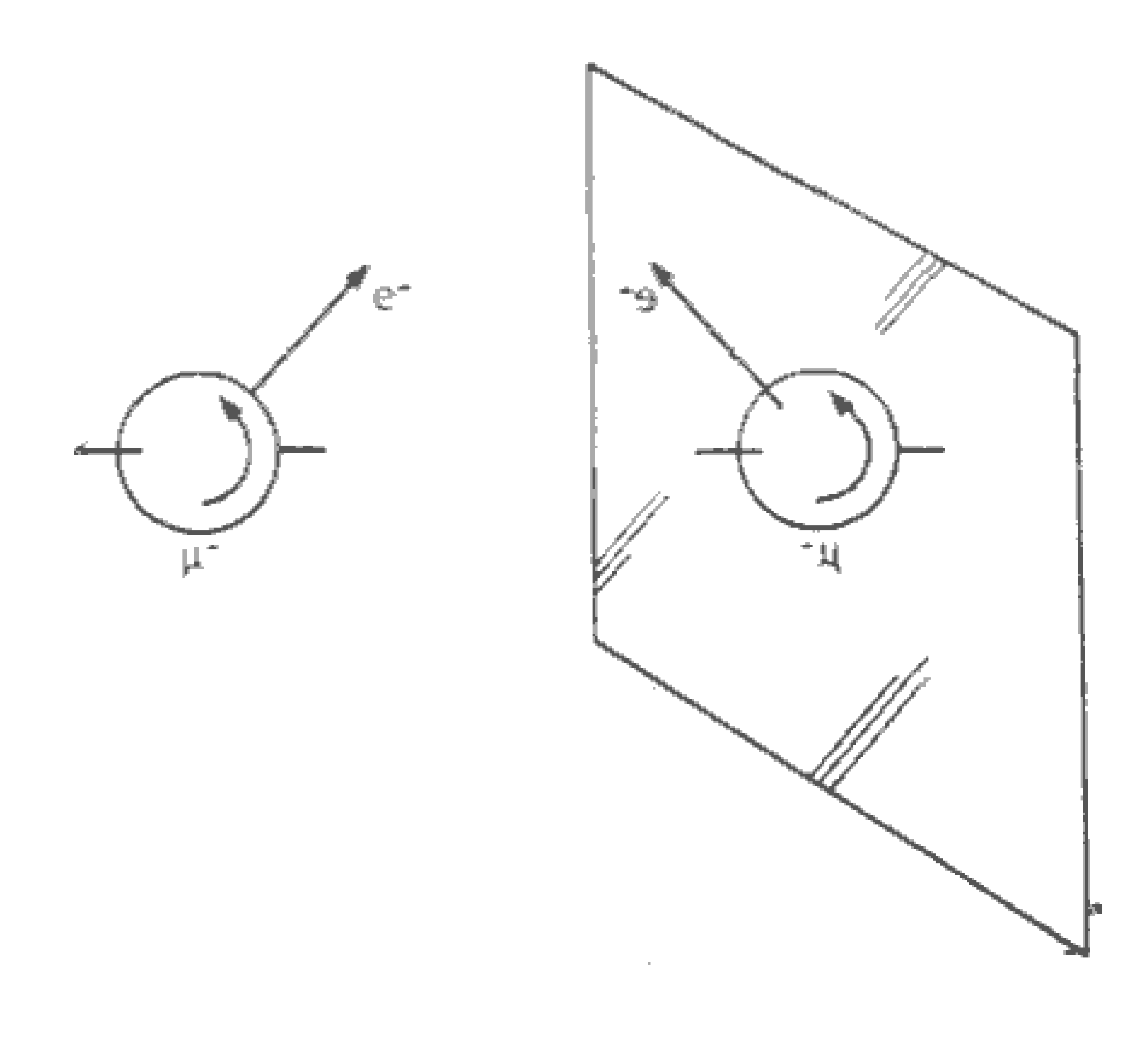
**شكل ١١** . انتهاك المماثلة . لقد برهنت تجربة وو Wu على أن جسيمات بيتا الصادرة عن نواة الكوبلت $Co^{60}$ تُفضِّل أن تتحرك مبتعدة في عكس اتجاه سبين النواة . لكن الأمر معكوس في الصورة المرآتية .



إلى $\mu^+$) . وعلى هذا نقول : لئن كان انحفاظ المماثلة P ( التناظر المرآتي للفضاء ) قد خُرق ، فإن المضمومة ش م ( CP ) ما تزال تناظراً سليماً قائماً .

إن اكتشاف انتهاك المماثلة ( أي عدم انحفاظها ) في عمليات القوى الضعيفة كان صدمة أصابت الفيزيائيين . فبالرغم من أن عالمنا مليء بالبنى التي تتمتع بيدوية ( كالحمض DNA ) ، فإن وجود يدوية فضلى في قوانين الفيزياء شيء أعمق بكثير . إنه يعني أن الطبيعة ، حتى في غير البنى المعقدة ، تميز بين اليسار واليمين . وقد كان يُظن أن الطبيعة لا تميز اليسار عن اليمين بأكثر مما تميز العالي عن الواطئ في فضاء خال . وتاريخ الفيزياء ينبئ أن الخطوات الكبيرة في تقدم العلوم يمكن أن تتم من خلال تحريات رياضية ، لاسيما حين تُستغلّ فكرة التناظر . ورغم أن التناظرات الرياضية يصعب ، أو حتى يستحيل ، تصورُها فيزيائياً ، فإنها يمكن أن تكون دليلاً على مبادئ جديدة في الطبيعة . وعلى هذا أصبح البحث عن تناظرات جديدة طريقةً فعالة في مساعدة الفيزيائيين على التقدم في طريق فهم هذا العالم .

**شكل ١٢** . عندما يتفكك الجسيم $\mu^-$ يُفضّل الإلكترون أن يذهب نحو الجهة اليمنى من محور الدوران ، كما رسمنا هنا ، أكثر من الجهة اليسرى ( يصدر أيضاً نتريونوهان غير مرسومين هنا ) . إن هذه النزعة غير تناظرية بالانعكاس . ذلك أن المرآة تُري أن الالكترون يفضل الذهاب نحو الجهة اليسرى . وهذا السلوك الثاني يحدث عندما يتفكك الجسيم المضاد .



إن التناظرات المستمرة التي ناقشناها حتى الآن تخص كلها الفضاء، أو الزمكان. على أن بالامكان أيضاً إيجاد تناظرات مستمرة من طبيعة أكثر تجريداً. وكما ذكرنا قبل قليل، يوجد صلة وثيقة بين التناظرات وقوانين الانحفاظ. وقانون انحفاظ الشحنة الكهربائية من أكثرها رسوخاً. والشحنة الكهربائية يمكن أن تكون موجبة أو سالبة، ويقول قانون انحفاظ الشحنة بأن مجموع الشحنات الموجبة مطروحاً منه مجموع الشحنات السالبة لا يمكن أن يتغير. وإذا التقت كمية شحنة موجبة كميةً مساوية من شحنة سالبة، تكون حصيلتهما شحنة معدومة. ويمكن أن تُخلق شحنة موجبة إذا صاحب ذلك خلق شحنة سالبة تساويها في الكمية. لكن لا يمكن أن يحدث تناقص ولا تزايد في مجموع شحنات جملة معزولة.

والآن، إذا كانت الشحنة منحفظة، يمكن أن نتساءل عما إذا كان يوجد تناظر يقود إلى هذا القانون. فقوانين الانحفاظ الدينامية كلها، كانحفاظ الاندفاع والطاقة، تقابل التناظرات الهندسية المستمرة. لكن قانون انحفاظ الشحنة يشير إلى خاصية تجريدية أكثر مما يشير إلى خاصية دينامية، مما يوحي بأن المسؤول عن انحفاظ الشحنة تناظر تجريدي. وكمثال على التناظر التجريدي مأخوذ من مجريات الحياة اليومية، فكّر في ظاهرة التضخم النقدي. فعندما تنخفض القيمة الحقيقية لليرة أو للدولار تنخفض معها ثروة المواطن ذي الدخل المحدود. ولكن إذا كان الدخل مرتبطاً بالمؤشر الاقتصادي، فإن القوة الشرائية للمواطن تكون مستقلة عن سعر النقد في سوق المال. وكطريقة مجازية للتعبير عن ذلك، طريقة سيظهر نفعها لأسباب ستتضح بعد قليل، نقول إن الدخل المرتبط بالمؤشر الاقتصادي متناظر إزاء التغيرات التضخمية النقدية.

وفي الفيزياء أمثلة عديدة على التناظرات غير الهندسية. أحدها يخص العمل اللازم لرفع ثقل ما. فالطاقة المصروفة لذلك تتعلق بالفرق الارتفاعي الذي صعده الجسم (لا تتعلق بالطريق المسلوك)؛ وهي، في كل الأحوال، مستقلة عن الارتفاع المطلق: فلا أهمية إذا كانت الارتفاعات مقيسة بالنسبة لسطح البحر أو بالنسبة لسطح الأرض، لأن المهم هو الفرق الارتفاعي الذي حصل. فهناك إذن تناظر للطاقة إزاء تغيرات اختيار الارتفاع الصفري.

وللحقل الكهربائي تناظر من هذا القبيل، تناظر يؤدي فيه الكمون الكهربائي دور الارتفاع. فلو حركت شحنة كهربائية من نقطة لأخرى في حقل كهربائي، فإن الطاقة المصروفة لا تتعلق إلا بفرق الكمون بين النقطتين الطرفيتين لمسار الشحنة. فإذا ارتفع الكمون بنفس الكمية عند هاتين النقطتين، تظل الطاقة المصروفة على قيمتها. يوجد إذن تناظر هام في معادلات مكسويل الكهرطيسية.

إن الأمثلة الثلاثة المعروضة هنا توضح معنى ما يسميه الفيزيائيون التناظرات العيارية gauge symmetries . ويمكن للمرء أن يفهم التناظرات المذكورة على أنها «إعادة تعيير» للنقد وللارتفاع وللكمون على الترتيب . إنها جميعاً تناظرات تجريدية ، بمعنى أنها ليست من طبيعة هندسية ، فلا نستطيع النظر إليها ورؤية التناظر ، لكنها تظل ملامح هامة تدل على خصائص المنظومات المدروسة . فالتناظر العياري من أجل الكمونات يضمن ، فعلاً وتماماً ، انحفاظ الشحنة الكهربائية . وقد أدَّت التناظرات العيارية دوراً مركزياً في البحث عن نظرية كمومية ناجحة في شتى قوى الطبيعة ، وفي إطارها جرت محاولات توحيد القوى .

وهكذا نرى كيف تنقسم التناظرات في الفيزياء إلى تناظرات هندسية ، كالدورانات والانعكاسات ، وتناظرات تجريدية ، كالتناظرات العيارية . وفي أوائل السبعينيات اكتشف النظريون ، على غير انتظار ، تناظراً هندسياً أعمق وأقوى من تلك العمليات الشائعة كالدورانات والانسحابات . وقد سموه التناظر الفائق supersymmetry .

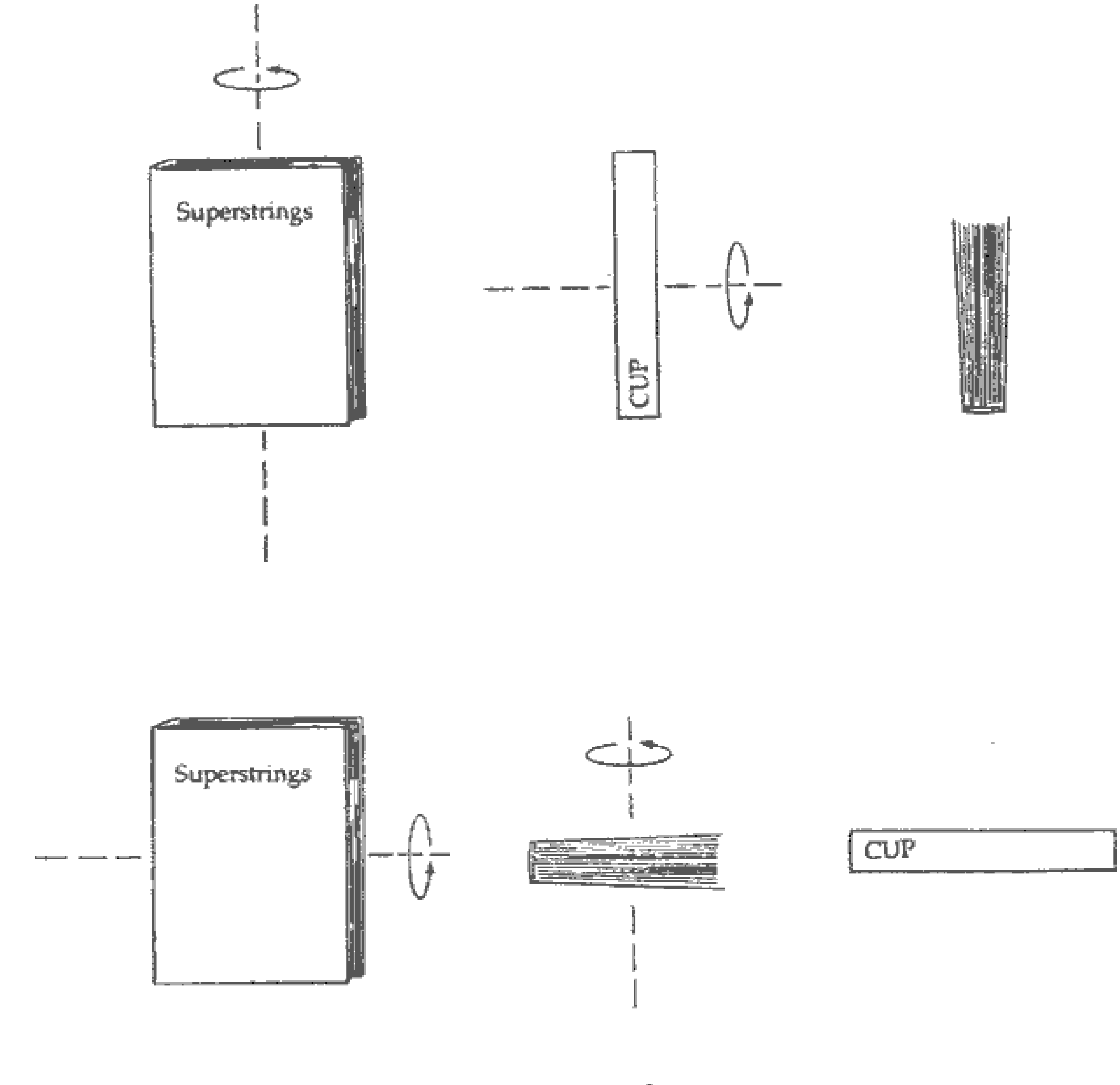
لقد ذكرنا في الفقرة ١ ــ ٥ أن بنية الفضاء الهندسية التي تتأثر بها الفرميونات مختلفة أساسياً عن البنية التي تتأثر بها البوزونات ؛ فالفرميون يجب أن يدور بزاوية 720° قبل أن يعود إلى الوضعية التي انطلق منها . وهذه «الميزة المضاعفة» للفرميونات تنطوي على أن جبر صفات التناظر الهندسي ، كالدورانات ، يختلف جذرياً لدى الفرميونات عنه لدى البوزونات والأجسام العادية . والواقع أن أحد أسباب الفروق الأساسية بين الفرميونات والبوزونات يعود بالضبط إلى أنهما يتمتعان بخصائص هندسية متخالفة تماماً .

إن السمة الجديدة للتناظر الفائق هي أنه يقدم إطاراً هندسياً تأخذ فيه الفرميونات والبوزونات صفات مشتركة . وهذا لا يمكن أن يحدث ضمن إطار العمليات الهندسية الشائعة في الفضاء العادي . ويمكن تمثيل عمليات التناظر الفائق رياضياً بإضافة أربعة أبعاد أخرى إلى أبعاد الزمكان الأربعة ، فيتشكل ما يسمى «الفضاء الفائق superspace» . والهدف من الأبعاد الأربعة الإضافية هو أن تتسع ، مع الأربعة الأولى ، للميزات الهندسية المضاعفة للفرميونات ، لذا فإن «الأبعاد الفرميونية» ، الزائدة لديها عما لدى البوزونات ، ليست مكانية ولا زمانية بالمعنى الذي نعرفه .

إن قواعد الهندسة في الأبعاد الإضافية الجديدة غريبة جداً . وكمثال على الفرق نفحص عملية التدوير . من السهل أن نتحقق أن نتيجة إجراء تدويرين متواليين تختلف باختلاف ترتيب إجرائهما . ويوضح الشكل ١٣ ذلك في حالة تدوير كتاب مرتين ، زاوية كل منهما 90°

فبحسب ترتيب هذين التدويرين نحصل على وضعيتين متخالفتين للكتاب . وإذا رمزنا بـ ت١ و ت٢ لهذين التدويرين المتواليين ، أمكن التعبير عن الفرق رمزياً بكتابته على الشكل ت١ ت٢ ≠ ت٢ ت١ ، أو الشكل المكافئ ت١ ت٢ ــ ت٢ ت١ ≠ صفراً . ويطلق على الفرق ت١ ت٢ ــ ت٢ ت١ ١سم مبادل ت١ وت٢ . **وانطلاقاً من مثل هذه العلاقات يستطيع المرء أن** يبني علم جبر يهتم بالدورانات ت في الأبعاد الإضافية الأربعة للفرميونات في الفضاء الفائق أيضاً . لكن الخصائص الهندسية لهذا القسم من الفضاء الفائق يجب أن تستوعب المزية الهندسية المميزة للسبين الأصيل . وقد تبين أن فعل ذلك لا يقتضي تناول المبادلات فحسب ، بل وما يسمى المبادلات المضادة anticommutators التي تظهر فيها إجراءات من الشكل

**شكل ١٣** . علاقات غير تبادلية . في النصف العلوي من هذا الشكل طبقنا على الكتاب دورانين بـ 90° . أولهما حول محور شاقولي والثاني حول محور أفقي . وفي النصف السفلي عكسنا ترتيب الدورانين ، فحصلنا على نتيجة مخالفة للأولى .



ت١ ت٢ + ت٢ ت١ . وإذا بدا ظهور الإشارة + في محل الإشارة − مسالماً ، فإن هذا الفرق ذو أثر هائل على الصعيد الرياضي . ذلك أن أوصافاً موحَّدة ، للبوزونات والفرميونات ، تبرز في أثناء صنع بناء رياضي متماسك . أي إن إجراءات التناظر الفائق قادرة ، بتعبير تقريبي ، على التحول من الزمكان العادي المعهود إلى تلك الأبعاد الإضافية الفرميونية وبالعكس . وبلغة الجسيمات نقول : إن كل عملية من هذا القبيل تقابل تحول بوزون إلى فرميون أو العكس . وعلى هذا الأساس يمكن أن ننظر إلى الفرميونات والبوزونات على أنهما ، إلى حدٍ ما ، « إسقاطان » مختلفان لأصل هندسي واحد .

إن ما شرحناه حتى الآن بخصوص التناظر الفائق يتناول الجانب الرياضي فقط . والآن يبرز السؤال عما إذا كان التناظر الفائق قد عُثر عليه في عالم الواقع . إذ لو كان العالم ذا تناظر فائق لحُقَّ لنا أن نتوقع ظهور برهان فيزيائي مباشر على الصلات بين الفرميونات والبوزونات . وهذا يقضي بأن نجد ، مثلاً ، لكل نوع فرميوني نديداً بوزونياً ، ولكل بوزون نديداً فرميونياً ، وذلك بشكل منهجي وبخصائص مقابلة ، أي يجب أن يوجد لكل جسيم صنوٌ في دنيا التناظر الفائق .

لا يوجد في قائمة البوزونات والفرميونات المعروفة اليوم جسيمان يمكن أن نزاوج بينهما بالأسلوب المذكور . لكن هذا لا يعني بالضرورة أن التناظر الفائق غير ذي علاقة بعالم الواقع . فغالباً ما يحدث ، في أحوال الطبيعة ، أن « ينكسر » فعلاً تناظر عميق لقوانين الفيزياء في الحالة الفيزيائية للمنظومة . ومثل هذا الانكسار يحدث ، مثلاً ، فيما يسمى القوة الكهرضعيفة electroweak ( انظر الفقرة ١ ـــ ١٠ ) ، حيث تناظر القوة العميق خفي . وقد تكون الطبيعة فائقة التناظر أساسياً ، لكن تناظرها هذا مكسور في معظم الظواهر المدروسة حتى الآن . هذا أولاً .

وثانياً ، لا يوجد سبب يجعل الفرميونات المعروفة أنداداً فائقة للبوزونات المعروفة . فقد يكون في الطبيعة ، مما لم نكتشفه بعد ، جسيمات هي الأنداد الفائقة للجسيمات المعروفة . وعلى هذا الأساس يُفترض ، مثلاً ، وجود جسيمات ، سُمِّيت فوتينوهات photinons ، تصلح لأن تكون الأنداد الفائقة للفوتونات . ويقال إن سبب عدم اكتشافها حتى الآن هو أن تفاعلها مع المادة المألوفة ضعيف جداً لدرجة أننا لا نملك كاشفاً يستطيع الشعور بها . وعلى هذا المنوال يتحدث أصحاب هذا الرأي عن الغلوينوهات gluinos ، كأنداد فائقة للغليونات ، وعن الغرافيتينوهات مقابل الغرافيتونات . وعندئذ توجد الأندادُ الفائقة البوزونية للفرميونات ، المسماة سكواركات squarks وسلبتونات sleptons . لكن جميع هذه الأنداد الفائقة « الأجنبية » ما تزال

وليدة التخمين حتى الآن . فالتناظر الفائق هو إذن فكرة نظرية عظيمة ، لكنها ما تزال تفتقر إلى شواهد ملموسة ذات دلالة لا شبهة فيها .

## ١ ــ ٩ . توحيد القوى

عندما اكتشف فارادي ، في ثلاثينيات القرن الماضي ، ظاهرة التحريض الكهرطيسي ، أماط اللثام عن وجود صلة وثيقة بين قوتين من قوى الطبيعة ، الكهربائية والمغنطيسية ؛ ومع ذلك وجب الانتظار إلى خمسينيات ذلك القرن قبل أن يصوغ مكسويل بشكل رياضي نظريته الكهرطيسية التي توحِّد بينهما . على أن فارادي كان قد تكهن ، عام ١٨٥٠ ، بإمكانية وجود صلة أخرى بين الكهرباء والثقالة . ولتحري هذه الفكرة صنع فارادي عدة أدوات بارعة تشكل جهازاً يستطيع أن يكشف به إذا كانت الأجسام المادية تولِّد في أثناء سقوطها حقولاً كهربائية . وفي الشكل ١٤ لوحة هزلية عن هذه المحاولة . كانت نتائج تجارب فارادي سلبية ، لكن ذلك لم ينل من شأن عقيدته الراسخة بأن القوتين ، الكهربائية والثقالية ، وجهان مختلفان لقوة فائقة واحدة .

أما المحاولة الثانية لإيجاد مخطط تتوحد فيه الكهرطيسية والثقالة فقد حدثت عام ١٩٢١ . كان ذلك بعد أن نشر أينشتاين نظريته الثقالية ــ نظرية النسبية العامة ــ ببضع سنوات . وقد شرحنا ، في الفقرة ١ ــ ٣ ، أن إحدى السمات المهمة لهذه النظرية تكمن في ضم المكان والزمان معاً كوحدة زمكانية ذات أربعة أبعاد . ولدى التأمل في هذا الأمر قرر الرياضي الألماني ، تيودور كالوزا Kaluza ، أن يكتب معادلات أينشتاين الحقلية الثقالية في خمسة أبعاد بدلاً من أربعة ، وذلك بأن أضاف ، بكل بساطة ، بعداً فضائياً خامساً تخيُّلياً . وكانت النتيجة مثمرة على نحو غير متوقع . ذلك أن « إسقاط » المعادلات الحقلية الجديدة ذات الأبعاد الخمسة في عالم الأبعاد الأربعة الزمكانية يسفر عن معادلات أينشتاين الثقالية **مضافاً إليها** مجموعة أخرى من المعادلات تبين أنها معادلات مكسويل الحقلية الكهرطيسية بالضبط . وهكذا يستطيع المرء ، من خلال صوغ الثقالة في خمسة أبعاد ، أن يحصل على الثقالة والكهرطيسية ، كلتيهما ، من نظرية واحدة . وبتعبير آخر ، ينتج من نظرية كالوزا أن الكهرطيسية ليست قوة منفصلة ، بل وجه من وجوه الثقالة ، وإن يكن ذلك في عالم ينطوي على بعد فضائي فوقي خفي .

لكن نقطة الضعف الأساسية في هذه النظرية هو أننا لا نشعر إلا بأربعة أبعاد في العالم الفعلي . ولكي يجوز لنا أن نحمل فكرة الأبعاد الخمسة على محمل الجد يجب أن نعلم ماذا حدث

للبعد الخامس. لقد أتى الفيزيائي السويدي، أسكار كلاين Klein، بجواب بسيط رائع لهذه المسألة عام ١٩٢٦. كان جواب كلاين يقول بأننا لا نلحظ البعد الخامس لأنه، بمعنى ما، «متقوقع» ملتفاً على نفسه في حيِّز صغير جداً. ويمكن تشبيه ذلك بخرطوم رش الماء. فعندما تنظر إلى هذا الخرطوم من بعيد لا ترى سوى خط متعرج. لكنك إذا فحصته عن كثب فسترى أن ما كان يبدو لك نقطة على الخط هو في الواقع دائرة تحيط بالأنبوب (شكل ١٥). تصور

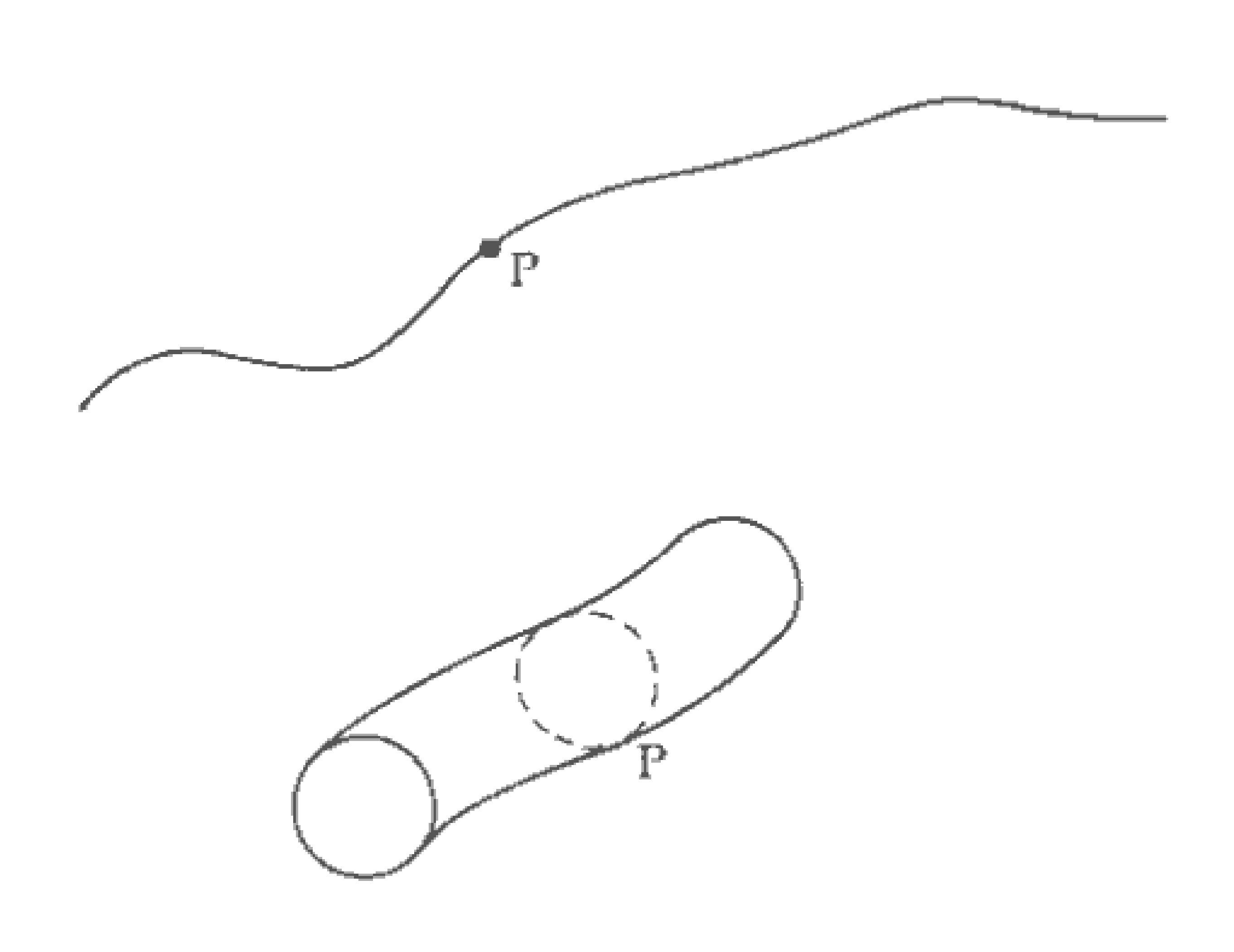
**شكل ١٤**. لوحة تمثل محاولة فارادي للبرهان على وجود صلة بين القوتين، الكهربائية والثقالية.

**أول محاولة في توحيد الكهرباء والثقالة**

إذن ، مع كلاين ، أن عالمنا يشبه ذلك . أي إن ما نظنه ، عادة ، نقطة في فضاء ذي ثلاثة أبعاد ، هو في الواقع دائرة صغيرة ملتفة في البعد الفضائي الرابع . فاللفيفة الصغيرة تبدو ، من أي موقع نظر ، متلاشية في غير اتجاه ، لا نحو الأعلى ولا نحو الأسفل ولا جانبياً ، في فضاء إحساساتنا . وحجة أصحاب هذا الرأي في عدم شعورنا بهذه اللفائف هو أن محيطها صغير لدرجة لا تُصدَّق .

أصبحت فكرة كلاين عادة شبه شائعة . لكن بعض ما يزعج فيها هو أن من الصعب تصور أين تلفُّ هذه اللفائف . **إنها ليست ضمن الفضاء ، لكنها امتداد له ، كخط يتلّوى بشكل** حلقي ليصنع أنبوباً . ونستطيع بسهولة أن نتصور ذلك في بعدين ، لا في أربعة أبعاد . وقد تمكن كلاين من حساب محيط اللفة على دائرة البعد الخامس من القيم المعروفة لوحدة الشحنة الكهربائية التي تحملها الإلكترونات والجسيمات الأخرى ، ومن شدة القوى الثقالية بين الجسميات . وقد وجد قيمة تساوي $10^{-30}$ سنتيمتر ، أي قرابة $10^{-17}$ من قطر نواة الذرة . ولا غرابة إذن في أننا لم نلحظ هذا البعد الخامس الافتراضي ، لأنه لا بدّ ملفوف في حيز أصغر بكثير جداً مما نستطيع تمييزه ، حتى في فيزياء الجسيمات دون النووية .

**شكل ١٥** . إن خرطوم رش الماء يبدو من بعيد خطاً متعرجاً لكن فحص نقطة ، P ، من الخط عن كثب يُظهر أن النقطة دائرة تحيط بالأنبوب . فما نراه نقطة في فضائنا ذي الأبعاد الثلاثة قد يكون في حقيقته دائرة تحيط ببعد فضائيٍّ . إن هذه الفكرة هي الأساس في نظرية كالوزا ــ كلاين التي توحد القوتين ، الكهرطيسية والثقالية .



إن نظرية كالوزا ــ كلاين ، رغم المهارة الكامنة فيها ، لم تزد كثيراً عن أن تظل طُرفة رياضية مدة تزيد عن خمسين عاماً . زد على ذلك أن فكرة توحيد الثقالة والكهرطيسية فقدت الكثير من جاذبيتها لدى اكتشاف القوتين ، الضعيفة والشديدة ، في ثلاثينيات هذا القرن . ذلك أن على كل نظرية توحيدٍ حقلية أن تنجح في ضم أربع قوى ، لا اثنتين فقط . ولم تكن هذه الخطوة ممكنة قبل أن يتوصل رجال العلم إلى فهم جيد للقوتين ، الضعيفة والشديدة .

ومن خلال الدراسات العديدة التي تناولت ، في الخمسينيات ، الجسيمات دون الذرية وقواها برزت صورة على درجة مذهلة من التعقيد أحبطت الآمال بالعثور على نظرية توحيد بسيطة . فقد تبين فعلاً أن الكهرطيسية وحدها ، من بين القوى الأربع المعروفة ، يحق لها أن تفخر بامتلاك نظرية (نظرية الإلكتروديناميك الكمومي ، انظر الفقرة ١ ــ ٧ .) متماسكة داخلياً ومتفقة أيضاً مع النظريتين الكبيرتين : النسبية وميكانيك الكم .

لكن القوى الثلاث الأخرى لم تكن قد فُهمت جيداً في ذلك الوقت . وقد جاء اكتشاف عدم انحفاظ المماثلة داعياً إلى إعادة نظر كاملة في نظرية القوة الضعيفة كي تستجيب لانكسار التناظر المرآتي في فعلها . وقد تم تنفيذ ذلك ، لكن النظرية الناجمة عنه لم تقدم أجوبة محسوسة إلا في بعض علميات القوة الضعيفة وما دامت ، بالتالي ، الطاقات العاملة غير عالية جداً . لكن الأجوبة كانت ، في معظم الأحوال ، غير معقولة . وبذلك كانت النظرية غير متماسكة رياضياً ، وذات قدرة ضعيفة على التنبؤ ، وذات خلل واضح في أساسها .

أما القوة الشديدة فلم تكن مفهومة بتاتاً . ذلك أن التفاعل فيما بين الهدرونات يبدو منطوياً على مجموعة قوى وحقول شتى ، بدلاً من قوة نووية شديدة واحدة . ونحن نعلم اليوم أن القوة بين الهدورنات ليست في الواقع سوى بقية معقدة من القوة الأصلية بين الكواركات ، في حين أن المحاولات الأولى كانت تستند على فكرة أن القوة بين الهدرونات هي الأساسية. فمنذ عام ١٩٣٥ اعتمد الفيزيائي الياباني ، هيديكي يوكاوا H.Yukawa ، نموذجاً للقوة الشديدة مستمداً من الإلكتروديناميك الكمومي ، وذلك بافتراض «مرسال» حامل للقوة الشديدة تتبادله الهدورنات فيما بينها ، مما أدى إلى التنبؤ الناجح بوجود البيون pion . ورغم ذلك تبين بعد قليل أن نموذج التبادل البيوني لا يقدم أكثر من وصف فج للقوة النووية الشديدة . زد على ذلك أن الحسابات في مجال عمليات القوة الشديدة قد قادت ، على غرار ما حدث في حال القوة الضعيفة ، إلى أجوبة غير معقولة في معظم الأحوال .

كان للثقالة وضع مميز في الخمسينيات . إنها ، بخلاف القوتين : الضعيفة والشديدة ، ذات صيغة نظرية متماسكة وأنيقة على المستوى التقليدي ( أي غير الكمومي ) ، أي في نسبية أينشتاين العامة بالتحديد . وهي ، فوق ذلك ، تقود إلى نبوءات معينة شهدت التجربة على صحتها . لكن الصعوبة الرئيسية برزت عندما حاول الفيزيائيون أن يصنعوا للثقالة توصيفاً كمومياً . لقد أصبحت عندئذ رياضياتها غير متماسكة ، مما جعلها ، على غرار ما حدث للقوة الضعيفة ، عاجزة عن التنبؤ بأي شيء إلا في أبسط العمليات .

كان معظم فيزيائيي الخمسينيات والستينيات يهملون صعوبات الصياغة الكمومية للثقالة ، لأن الثقالة واضحة المعالم في المدى الفلكي فقط ، حيث تتجلى نظرية أينشتاين التقليدية بشكل كامل . إن اقتران الغرافيتونات ( إصدارها وامتصاصها ) بالجسيمات الأخرى أضعف جداً من أن يُرصد أو من أن يؤدي دوراً مباشراً في فيزياء الجسيمات . لكن الصعوبات ، في الثقالة الكمومية ، كانت في كل شيء أشد من تلك التي تُصادف في القوتين : الضعيفة والشديدة . ونظرية النسبية العامة تحتل مركز الصدارة في فيزياء القرن العشرين ، وليس فقط بالاعتماد على صحة نبوءاتها ، بل لأنها أيضاً نظرية تستند على مبادئ عميقة جداً وواضحة وأنيقة ، وهي بسيطة في جوهرها وجذابة في رياضياتها ، وتجعل من الثقالة قضية هندسية . إنها إذن مغرية على الصعيد الجمالي وجذابة على الصعيد الفلسفي .

أما نظرية الكم فلها وضع مختلف بعض الشيء . فهي لا تتمتع بالبساطة الأصلية والجاذبية الجمالية المعهودتين في النسبية العامة . زد على ذلك أن فرضياتها الأساسية تعارض الإحساس البدهي ، وتحوم حول تماسكها الفلسفي شكوك خطيرة من حيث العلاقة بالراصد ( لمعرفة تفاصيل هذا الجانب يحسن بالقارئ أن يعود إلى كتابنا « الشبح في الذرة **The Ghost in the Atom** » ) . لكنها ، من جهة أخرى وعلى صعيد التطبيقات ، أكثر نجاحاً بكثير من النسبية العامة . فميكانيك الكم أداة لا غنى عنها في فيزياء الجسيمات ، وفي الفيزياء النووية والذرية والجزيئية وفيزياء الحالة الصلبة ، وفي الكيمياء الفيزيائية ، وفي علم الضوء الحديث ، وفي فيزياء النجوم وعلم الكون .

يقال عادة عن فيزياء القرن العشرين إنها تقوم على نظرية النسبية العامة ونظرية الكم . وأولى هاتين النظريتين أكثرهما جمالاً وإقناعاً ، لكنها أقلهما تطبيقاً ؛ أما الثانية فضبابية بمعنى ما ، لكنها **ذات نجاحات « قياسية » لم يسبق لها مثيل في العلم . لكن واقع التعارض بين هاتين النظريتين** ينطوي على خلل عميق وخطير في قلب الفيزياء . وعلى كل نظرية تهدف إلى أن تكون نظرية كل شيء أن تخلو من هذا الخلل .

## ١ ــ ١٠ النظريات العيارية الموحدة

كان يُظن ، طوال عدة سنوات ، أن مسألة الثقالة الكمومية عصية تماماً على المعالجة . وقد صُرف النظر عن هذا الموضوع حين كان الفيزيائيون يوجهون عنايتهم إلى القوتين : الضعيفة والشديدة . وفي أوائل الستينيات اكتشف شلدون غلاشو أن القوة الضعيفة والقوة الكهرطيسية ، رغم اختلافهما السطحي ، لهما صفات متشابهة عديدة في مستوى أعمق . فكلتاهما ، مثلاً ، محمولتان على بوزونات تبادلية سبينها 1 . زد على ذلك أن من الممكن فهم القوة الضعيفة على أساس من « شحنة » ضعيفة ومن « تيار ضعيفي » يشبهان من عدة وجوه مفهومي الشحنة والتيار الكهربائيين .

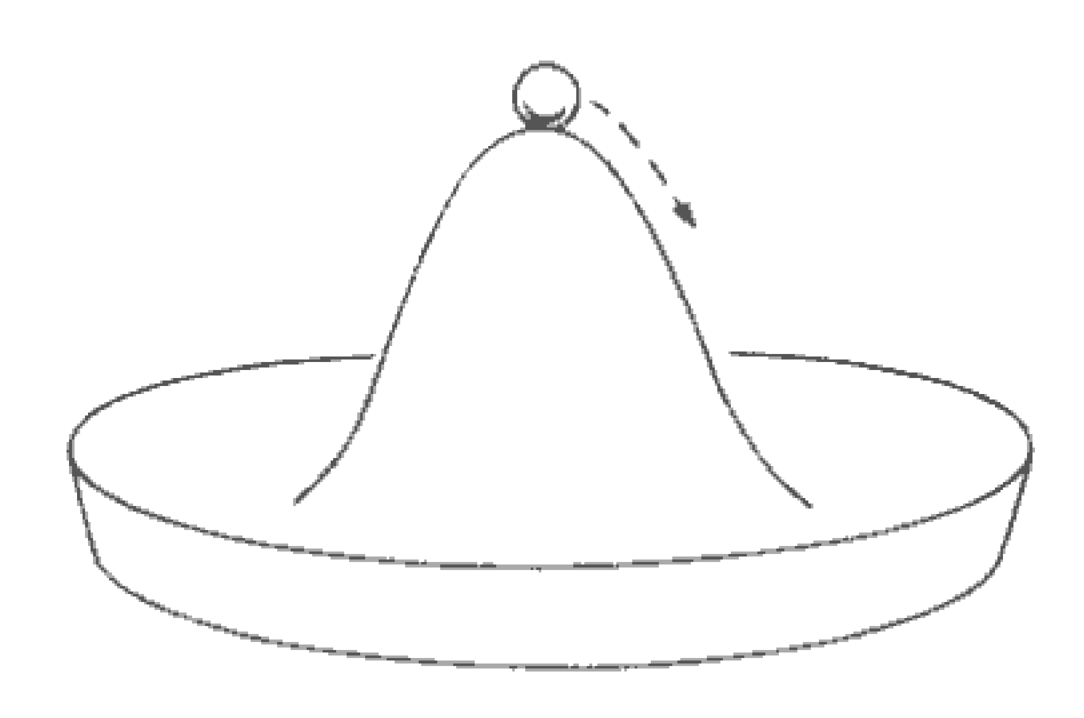
إن الفرق الرئيسي بين هاتين القوتين هو أن الفوتون عديم الكتلة وأن القوة الكهرطيسية طويلة المدى ، في حين أن كموم حقل القوة الضعيفة ذات كتل كبيرة جداً وأن القوة نفسها قصيرة المدى جداً . ولو كانت القوة الضعيفة تشارك القوة الكهرطيسية في طول المدى لكانت القوتان متطابقتين تقريباً . وهكذا بدأ الفيزيائيون يعتقدون أنه قد يكون من الممكن صنع نظرية تمزج القوتين معاً كقوة واحدة ، سيراً على طريق برنامج التوحيد الذي بدأه مكسويل في القرن التاسع عشر .

لقد بيَّن التحليل الرياضي أن انعدام كتلة الفوتون ذو صلة وثيقة بالتناظر العياري الذي أدخله مكسويل في معادلات الحقل الكهرطيسي . وهذا التناظر العياري هو الذي برز كخاصة بالغة الأهمية تضمن التماسك الذاتي للإلكتروديناميك الكمومي . وبخلاف ذلك يتبين أن كبر كتل حوامل القوة الضعيفة هو الذي يكسر كل تناظر عياري يمكن أن يوجد في الدينامية الكامنة . وانكسار هذا التناظر العياري كان سبب الشك في صحة النظريات الأولى في القوة الضعيفة . وقد أحيا التغلب على هذه الصعوبة الأمل في العثور على نظرية متماسكة في القوة الضعيفة وفي توحيدها مع القوة الكهرطيسية .

وفي أواخر الستينيات أدرك واينبرغ ومحمد عبد السلام ، كل على حدة ، أنه قد يكون ممكناً لحوامل القوة الضعيفة أن تمتلك كتلاً دون أن ينكسر التناظر العياري الكامن في القوة الضعيفة . وبدلاً من صنع كتلة في المستوى الأساسي للنظرية ، أي في معادلاتها الدينامية ، يمكن لهذه الكتلة أن تبرز « تلقائياً » كنتيجة لبعض التفاعلات التي تحدث في حقل القوة الضعيفة . وبذلك أمكن اعتبار ظهور الكتلة قضية ثانوية لا تمس التناظر العياري القائم في المعادلات الدينامية .

إن الفكرة القائلة بأن التناظر العياري الضعيف يمكن أن ينكسر تلقائيـاً ، لا ديناميـاً ، تستند على التشابه مع أشكال أخرى من انكسار التناظر تلقائيـاً في ظواهر شائعة في عدة فروع من الفيزياء. وإليك ، في الشكل ١٦ ، إيضاحـاً لمثال بسيط مأخوذ من الميكانيك التقليدي. تصور كرية على قمة سطح «قبعة مكسيكية». إن التناظر واضح في حالة هذه الجملة إزاء الدوران حول المحور الشاقولي المار بقمة القبعة. وليس في هذه الجملة أيضـاً أي اتجاه أفقي مفضل ، لأن فعل الثقالة شاقولي : فالقوى الفاعلة كلها متناظرة إذن دورانيـاً. وبتعبير آخر نقول : إن وضع الكرية (أي حالة الجملة) في هذا الشكل ينبىء عن التناظر الكامن في القوى الفاعلة. لكن هذه الحالة قلقة حتمـاً ؛ لأنك لو تركت الكرية لشأنها فستتدحرج نحو الأسفل على سفح القبعة ، وبعد فقدان طاقتها يتفق لها أن تتوقف في مكان ما من «خندق القبعة» (شكل ١٦). وهذا الوضع مستقر ، لكن التناظر الدوراني السابق قد انكسر. واضح أن الوضع الذي اختارته الكرية في الخندق غير ذي أهمية عميقة : إنه عشوائي بحت. إن الكرية ، بالاضافة إلى أنها اختارت في النزول اتجاهـاً معينـاً بالنسبة لسطح القبعة ، تنبئ عن أن حالة الجملة لم تعد تعكس التناظر الكامن في القوى. فهذا النوع من انكسار التناظر ، أي ذلك الذي ما يزال تناظر القوى فيه قائمـاً ، هو الذي نسميه «تلقائيـاً».

**شكل ١٦** . انكسار التناظر تلقائيـاً. الكرية موضوعة عند قمة سطح «القبعة المكسيكية». يوجد في هذا التشكيل تناظر دوراني تام. لكن هذا التشكيل غير مستقر. إذ لا تلبث الكرة أن تتدحرج لتستقر في نقطة ما من «حوض القبعة» السفلي ، وبذلك ينكسر التناظر الدوراني. أي أن هذه المنظومة قد دفعت تناظرها ثمنـاً لاستقرارها.



يقول واينبرغ وعبد السلام بأن الجسيمات W و Z تكتسب كتلها من الانكسار التلقائي للتناظر العياري الكامن في القوة الضعيفة. وبهذا الشكل يظل التناظر الأصيل موجوداً، لكنه خفي. وتعليل الكتل هذا يتيح للقوة الضعيفة أن تقف على قدم المساواة مع القوة الكهرطيسية، ويتيح لنا أن نعطيهما أوصافاً مشتركة. أما في الحالة الكمومية الفعلية للجملة فإن W و Z لا يعكسان التناظر العياري الكامن بسبب عظم كتلتيهما، رغم أن الأمور يمكن أن تحدث بما يُبقي الفوتون منبئاً، بانعدام كتلته، عن التناظر العياري.

ولاستكمال هذه النتائج أدخل واينبرغ وعبد السلام حقلاً كمومياً اسمه حقل هِغز Higgs، نسبة إلى مخترعه الأول، بيتر هِغز. وكموم حقل هغز بوزونات كتلية عديمة السبين. ومفعول الاقتران بين حقل هغز والحقول الكهرضعيفة يتمثل بدخول طاقة كامنة لها شكل القبعة المكسيكية المرسومة في الشكل ١٦ بالضبط (رغم أن السطح هنا فضاء تجريدي، لا فضاء حقيقي كالذي في الشكل). وبفعل هذا الاقتران تنزع الجملة إلى احتلال الحالة الكمومية ذات الطاقة الصغرى (كرية في الخندق) التي تتمثل هنا باكتساب W و Z كتلتين كبيرتين.

إن نظرية غلاشو ـــ سلام ـــ واينبرغ تقدم تفسيراً جميلاً للفروق بين شدة القوة الضعيفة في الطاقة المنخفضة وشدة القوة الكهرطيسية. ذلك أن للقوتين كلتيهما شدتي تفاعل من رتبة واحدة، ويمكن اختراع «شحنة ضعيفة» g تشبه الشحنة الكهربائية e، مما يقود إلى ثابتة فعلية للاقتران الضعيف هي $\frac{g}{M}$ حيث ترمز M لكتلة الجسيم W. وبما أن M كبيرة جداً (قرابة 80 كتلة بروتونية) ينتج أن الشدة الفعلية للاقتران الضعيف، كما يوحي بذلك اسمه، صغيرة جداً.

إن النسبة $\frac{e}{g}$ وسيط حر في النظرية. ويُعبَّر عنه عادة بزاوية $\Theta$ عبر العلاقة $e = g \sin\Theta$. وقيمة $\Theta$ تتعين بالتجربة. وقد وُجد أنها زهاء 28°. وهكذا تنبئ $\Theta$ عن الشدة النسبية الفعلية للقوتين.

إن مفتاح الاختبار النظري لهذه النظرية كان البرهان على خلوّها من العيوب الرياضية التي كانت تشوب النظرية القديمة في التفاعل الضعيف. زد على ذلك أن سلوك النظرية في الطاقات العالية مُرضٍ تماماً. فالواقع أن تزايد طاقة العمليات المدروسة يؤدي إلى تناقص الفرق بين شدة القوة الضعيفة وشدة القوة الكهرطيسية؛ وفي الطاقات التي تضاهي M (80 جيغا الكترون فولت، جيغا = $10^9$) يتضح أن القوتين متطابقتان جوهرياً.

وبخصوص التجربة تتنبأ النظرية الجديدة بعدد من المفعولات الفيزيائية الرهيفة والقابلة، مع ذلك، للقياس. وأحد هذه المفعولات هو تبعثر scattering (انتثار) النترينوهات عن النترونات دون أن تفقد النترينوهات هويتها، وهي عملية مستحيلة في النظرية القديمة. ففي تجربة أجريت عام ١٩٧٣ في سيرن CERN (مركز البحوث النووية الأوربي قرب جنيف)، على حزمة غزيرة من النترينوهات تخترق حجرة فقاعات(*)، تبين بما لا يقبل الشك أن النترينوهات تنتثر عن نترونات نوى ذرات السائل في الحجرة. أما الشاهد التجريبي الحاسم على صحة نظرية غلاشو ــ سلام ــ واينبرغ فقد أتى في نهاية عام ١٩٨٣ وبداية عام ١٩٨٤، عندما أمكن إنتاج جسيمات W و Z للمرة الأولى من تصادمات عالية الطاقة بين حزمة بروتونات مضادة وبين بروتونات السائل، في سيرن أيضاً. كانت كتلتا هذين الجسيمين تتفقان جيداً مع نبوءة النظرية باعتماد القيمة المعروفة لـ $\Theta$.

لقد قادت هذه النجاحات المشجعة إلى الاعتقاد بأن القوة الكهرطيسية والقوة الضعيفة هما حقاً وجهان لقوة واحدة كهرضعيفة. لكن الوسيط $\Theta$ يظل غير معين بالنظرية؛ وعلى هذا ربما كانت كلمة «تشابك» أنسب من كلمة «توحيد». بيد أن العنصر الحاسم في هذا النجاح هو صياغة النظرية بلغة التناظرات العيارية، وهذا ما شجع على الفحص النظري لتشكيلة من النظريات العيارية في أوصاف القوتين: الشديدة والثقالية، وإمكانية توحيدهما مع القوة الكهرضعيفة.

إن الحديث عن التناظرات العيارية يتم في فرع من الرياضيات اسمه النظرية الزمرية group theory. والزمرة مجموعة من الكائنات الرياضية (تتمثل عادة بمصفوفات matrices في معظم الأحوال) يمكن تركيبها معاً بعمليات ضرب (خاضعة لبعض قيود تقنية). ويمكن ترميز كل تناظر باسم الزمرة التي يولد فيها. وكمثال بسيط تناظر الدائرة. فالدائرة تظل متناظرة عندما تدور بأية زاوية حول مركزها. وعلم الجبر في دورانات من هذا القبيل يشكل زمرة يرمز لها بـ U(1)، والحرف U هو الأول من كلمة unitary (وحدوية)، وهي خاصية تقنية رياضية. وبذلك يصبح التناظر العياري للحقل الكهرطيسي التناظرَ U(1) بالضبط، لكن في فضاء تجريدي بدلاً من الفضاء الحقيقي.

إن القوة الكهرضعيفة تضم الزمرة U(1) مع زمرة أكثر تعقيداً بقليل ورمزها SU(2)، حيث S هو الحرف الأول من كلمة special (خاص)، لكننا لا نحتاج هنا إلى تفاصيل خواصها. وللقوة

(*) كاشف للجسيمات مملوء بسائل يولد الجسيم المار فيه فقاعات على طول مساره، مما يسمح بكشف مرور الجسيم وبتصوير شكل مساره. (المترجم)

الشديدة ، التي تكلمنا عنها في الفقرة ١ ـــ ٦ ، أوصافٌ نظرية ، بلغة الكروموديناميك الكمومي ، يجب التزامها . وهي نظرية عيارية أيضـاً تعتمد على زمرة عيارية ، SU(3) ، أكثر تعقيداً من SU(2) . وقد جرت ، في أواسط السبعينيات ، عدة محاولات لتوحيد الكهرضعيفة مع الكروموديناميك الكمومي لصنع ما يسمى « قوة كبيرة موحدة » . ونظريات التوحيد الكبير هذه ( التي سنرمز لها بـ ن ت ك Grand Unified Theories GUT ) تستند إلى البحث عن زمرة عيارية أوسع وأشمل تضم ، كزمر فرعية ، زمرة الكروموديناميك الكمومي ، SU(3) ، والزمـرتين العياريـتين ، SU(2) و U(1) ، للقوتين : الضعيفة والكهرطيسية . وفي هذه المخططات لا يعود الوسيط Θ حراً بل يتعين بالطريقة التي تتحلل بها الزمرة الواسعة الشاملة إلى الزمر الفرعية المطلوبة .

إن السمة العامة لنظريات التوحيد الكبير هي أنها تمزج معـاً هويات منابع القوى الثلاث . فبذلك أصبحت اللبتونات ، وهي منابع القوة الكهرضعيفة ، شريكة للكواركات ، وهي منابع القوة الشديدة . والدليل على هذا التشارك يأتي من واقع أن عدد الكواركات يساوي عدد اللبتونات ( أو هكذا يُعتقد على الأقل ) . ويحصل هذا التمازج بتبادل مجموعة من المراسيل الجسيمية ، يرمز لها جماعيـاً بالحرف X . فتبادل جسيمِ X يمكن أن يحوِّل الكوارك إلى لبتون ، والعكس بالعكس .

وهنا أيضـاً تمتلك القوى وجوهـاً متخالفة في الطاقات المنخفضة ؛ أما في الطاقات العالية فتندمج كلها معـاً بشكل قوة واحدة . والطاقة التي يحدث عندها هذا الاتحاد يمكن أن تتعين من أن القوة بين الكواركات تنشأ مع حدوث الانفصال فيما بينها . تذكر ، لفهم ذلك ، أن مبدأ هايزنبرغ الارتيابي يربط بين الطاقة والاندفاع من جهة والزمن والمسافة من جهة أخرى . فالتجارب في الطاقات المنخفضة تنبئ عن سلوك الكواركات وهي مفصولة بمسافات كبيرة ، في حين أن التجارب في الطاقات العالية تنبئ عن سلوك الكواركات عندما تقترب جداً بعضـاً من بعض . ومن الممكن أن نحسب المسافة ـــ ومن ثم الطاقة ـــ التي تنزل عندها شدة القوة بين الكواركات إلى مرتبة القوة الكهرضعيفة ؛ وهي الطاقة التي نتوقع أن يتجلى التوحيد عندها ، بسبب بلوغ القوى الثلاث شدات متقاربـة . وطاقـة التوحيـد المناسبـة لذلك أعظـم بقرابـة $10^{13}$ مرة من طاقـة التوحيـد الكهرضعيف ، وهي طاقة أعلى بكثير جداً من الحدود التي نستطيع إجراء تجارب اختبار فيها .

لكن لنظريات التوحيد الكبير ، لحسن الحظ ، نبوءات في الطاقات المنخفضة أيضـاً . فقد ذكرنا قبل قليل أن النظرية تمزج اللبتونات والكواركات . وفي طاقة التوحيد يجب أن يصدر هذان النوعان الجسيميان ، المختلفان في ظروف أخرى ، بهوية واحدة . إن هذا التمازج ضئيل في الطاقات المنخفضة نسبيـاً التي نُجري فيها تجاربنا الفيزيائية على الجسيمات ، لكننا قد نستطيع كشفه .

وأكثر النتائج أهمية ، في قضية التمازج اللبتوني ـــ الكواركي ، هي التنبؤ بأن البروتون قلق ، ويمكن أن يتفكك . وفي أحد مخططات هذا التفكك يتحول الكوارك السفلي في البروتون إلى بوزترون مصحوباً بتحول أحد الكواركين العلويين إلى كوارك علوي مضاد . وعندئذ يتشكل بيون من الكوارك المضاد والكوراك العلوي الآخر .

إن الوقوف بالمرصاد لحوادث تفكك البروتون هو مفتاح نظريات التوحيد الكبير . لكن فترة حياة البروتون تتراوح ، مع الأسف ، بين $10^{28}$عاماً ومدة أعلى بكثير تختلف باختلاف **ن ت ك** المستخدمة لحسابها . لكن يبدو من العسير تقنياً أن نكتشف مباشرة تفكك البروتون إذا كانت فترة حياته أطول بكثير من $10^{23}$ عاماً ، وعلى هذا فإن الإخفاق في كشف تفكك البروتون يمكن أن يدعو إلى استبعاد بعض نظريات التوحيد الكبير .

إن التقنية الشائعة في كشف حوادث التفكك تقضي بأن نقف بالمرصاد للجسيمات الآتية من كتلة مادية كبيرة . وتفكك البروتون ، ككل الحوادث الكمومية ، عملية إحصائية ؛ فإذا كان العمر الوسطي للبروتون من رتبة $10^{32}$ عاماً ، يحق لنا أن نأمل باكتشاف تفكك واحد في السنة من كتلة تحوي ما يقرب من $10^{32}$ بروتوناً .

لقد أُجريت تجارب عديدة من هذا القبيل ، كانت إحداها ، وهي التي جرت في منجم ملح عميق تحت بحيرة إيراي ( وهو موضع اختير للتقليل من شأن الأشعة الكونية التي يمكن أن تحجب الحادث المقصود ) ، تستخدم مستودع ماء كبيراً عُلقت فيه مجموعة من المضاعفات الفوتونية photomul tipliers . فأي جسيم مشحون سريع صادر عن تفكك البروتون سيعطي برقاً ضوئياً مميزاً ( يسمى إشعاع تشيرينكوف Cerenkov ) عندما يسير عبر الماء . وهدف التجربة هو كشف هذا الاشعاع الثانوي . لكن القائمين على هذه التجربة لم يسجلوا ، حتى كتابة هذه السطور ، أي حادث تفكك بروتوني واضح .

هناك إمكانية اختبار آخر ، لنظريات التوحيد الكبير ، يأتي من مجال مختلف تماماً : وحيدات القطب المغنطيسي magnetic monoples . إن كل المغانط ذات قطبين ، أي إنها تحوي قطبين ، شمالياً وجنوبياً ، معاً . ذلك لأن منبع المغنطيسية يمكن أن يُعزى ، في كل الأحوال ، إلى حركة الشحنات الكهربائية ، كالتيار الكهربائي وحركة الإلكترونات في الذرة . فجريان التيار في سلك حلقي يولِّد قطباً شمالياً في أحد جانبي الحلقة وقطباً جنوبياً في الجانب الآخر . والشحنة المغنطيسية تظهر على شكل قطب معزول ، شمالي أو جنوبي . أو ما يسمى قطباً مغنطيسياً وحيداً .

ورغم افتقاد البرهان التجريبي على وجود جسيمات ذات قطب مغنطيسي واحد ، فقد درس ديراك كيف يمكن إدخالها في الفيزياء الكمومية . وكان أن أعلن ، في نشرة مشهورة ظهرت عام ١٩٣٠ ، أن وحيدات القطب المغنطيسي ، إن وجدت ، تحمل شحنة مغنطيسية ، m ، تربطها بالشحنة الكهربائية الطبيعية ، e ، علاقة بسيطة ، هي أن الجداء em يساوي $\frac{h}{2p}$ ( $em = \frac{h}{2p}$ ) أو أمثالاً صحيحة من هذه الثابتة . وهذه النتيجة الغريبة تعني ، من جملة ما تعنيه ، أن وجود وحيد قطب مغنطيسي واحد في هذا العالم يجعل قيمة e ثابتة في كل مكان ، مما قد يفسر لماذا كانت أية شحنة كهربائية أمثالاً صحيحة من هذه الوحدة الأساسية .

لكن أعمال ديراك لا تقدم وسيلة لمعرفة الخواص الأخرى التي يجب أن يمتلكها وحيد القطب المغنطيسي المفترض ، ككتلته مثلاً ، الأمر الذي دعا الفيزيائيين ، طوال سنوات ، إلى التفكير بأن وحيد القطب المغنطيسي أحد الجسيمات التي تبيحها قوانين الطبيعة ، لكن الطبيعة اختارت أن لا تستخدمه . وهذه الفكرة تغير منطلق نظريات التوحيد الكبير . ذلك أن هذه النظريات لا تنطوي فقط على وحيدات القطب المغنطيسي بل وتحتاج إليها فعلاً . زد على ذلك أن النظرية تقدم تفاصيل هامة أخرى حول خصائصها المحتملة .

إن الكتلة المتوقعة لوحيد القطب تضاهي كتلة الجسيمات X ، أي قرابة $10^{15}$ كتلة بروتونية ، وهي قيمة ضخمة ( كتلة جرثومة ) لدرجة أنها تفسر عدم نشوء وحيدات القطب في تجارب التصادم بين الجسيمات . لكن ربما توفرت الطاقة اللازمة لذلك في أثناء الطور البدئي من خلق العالم ، مما دعا بعض الفيزيائيين إلى البحث عن وحيدات القطب « المستحاثة » التي خلّفها الانفجار الأعظم Big Bang .

إذا كان لوحيدات القطب وجود في هذا الكون ، وكانت ترد على الأرض من جملة الأشعة الكونية ، يكون من شأنها أن تحدث آثاراً متميزة . فوحيد القطب الذي يضرب ، مثلاً ، نواة ذرية قادر على تفكيك البروتون . ويمكن أن يكون لهذه الجسيمات بصمة كهرطيسية متميزة أيضاً . إذ لو كنا حيال تيار كهربائي يسري في سلك دائري مصنوع من مادة فائقة الناقلية superconducting ، فإن تدفق الحقل المغنطيسي عبر سطح الدارة يكون مؤلفاً من كموم ، أي من أمثال صحيحة من $\frac{h}{2\pi}$ . وإذا مر وحيد قطب مغنطيسي عبر سطح هذه الدارة فإن التدفق لا بدّ أن يقفز ، بفعل التحريض الكهرطيسي ، أمثالاً صحيحة من هذه الوحدات . وعلى هذا الأساس يكفي المجربَ أن يحتفظ بالدارة في حالة ناقلية فائقة وأن يأمل بمرور وحيد قطب عبر

سطحها . ومع أن « طرقة » مريبة مزيفة حصلت في عيد القديسة فالنتين من عام ١٩٨٢ ، إلا أن أحداً لم « يلتقط » حتى اليوم بهذه التجربة أو سواها واحداً آخر .

## ١ ــ ١١ . الثقالة الفائقة

بالرغم من التقدم المشجع الذي حصل في السبعينيات بخصوص مخططات توحيد القوى الكهرطيسية والضعيفة والشديدة ، ظلت الثقالة خارج الموضوع . لكن نظريي الثقالة لم يدخروا جهداً في تلك الفترة . ففي أواسط السبعينيات صنعوا امتداداً مهماً لمفهوم التناظر الفائق . تذكَّر (انظر الفقرة ١ ــ ٨ ) أن التناظر الفائق هندسي في أساسه ، وإن يكن أقرب إلى النوعية التجريدية . ونظرية أينشتاين النسبوية العامة هي الآن بالطبع نظرية هندسية في الثقالة . وقد اكتشف عدة أشخاص ، كل منهم على حدة ، أن هندسة التناظر الفائق يمكن أيضاً أن تُتخذ أساساً لنظرية هندسية في الثقالة . فنتج عن ذلك نظرية عُرفت باسم الثقالة الفائقة supergravity .

إن الثقالة الفائقة تضم نظرية أينشتاين النسبوية العامة وتشكل امتداداً لها . فنظرية أينشتاين تظل صحيحة بالتقريب ، الأمر الذي لا يهدد اتفاقها الرائع مع النتائج الرصدية . لكن الصفة الرئيسية للثقالة الفائقة هي أن الغرافيتون لم يعد الجسيم المرسال الوحيد المسؤول عن نقل القوة الثقالية . تذكَّر أن التناظر الفائق يقدم صلة بين الفرميونات والبوزونات . فإذا طبق المرء عملية تناظر فائق (عملية رياضية تنطوي على تدوير من الأبعاد العادية إلى الأبعاد الفرميونية الإضافية ، راجع نهاية الفقرة ١ ــ ٨ ) على الغرافيتون ، وهو مرسال سبينه 2 ، تقوده النظرية إلى جسيم سبينه $\frac{3}{2}$ . ونحن لا نعرف الآن في الطبيعة جسيماً سبينه $\frac{3}{2}$ ؛ فهذا إذن شيء جديد . وقد دُعي هذا الجسيم باسم غرافيتينو ، وقد يكون واحداً من ثمانية أنواع بحسب الشكل الخاص للنظرية المستخدمة . والغرافيتينوهات تشترك مع الغرافيتونات بكونها ضعيفة التفاعل بصورة مفرطة ، مما يجعل اكتشافها التجريبي صعباً جداً .

وبتطبيق عمليات تناظر فائق أكثر عدداً نحصل على عدد أكبر من الجسيمات سبيناتها 1 ، $\frac{1}{2}$ ، O . وفي أفضل نظرية ثقالة فائقة ، تلك التي يُرمز لها بـ « N = 8 » على أساس وجود ثمانية غرافيتينوهات ، يكون العدد الكلي لأنداد الغرافيتون الفائقة مساوياً 172 . وقد جرت محاولات لاستكشاف بعض هذه الأنداد الفائقة من ضمن الجسيمات المعروفة في فيزياء الطاقة العالية وذلك للتزود بمخطط توحيد فائق . وفي هذا المفهوم الشامل جداً لا بدّ أن تنتمي الجسيمات

الحاملة للقوى الأخرى ـــ الفوتون والغليونات و W و Z ـــ وكذلك الغرافيتون ، إلى طائفة فائقة عملاقة واحدة ، عدودة multiplet من الجسيمات ترتبط فيما بينها برباط التناظر الفائق . وبذلك يمكن أن تتوحد القوى كلها ، فلا تتجلى كل قوة إلا بوجه واحد من وجوه قوة فائقة مفردة فائقة التناظر . لكن هذا لن يكون كل شيء . فبسبب احتواء الطائفة الفائقة على فرميونات أيضاً ، يمكن إشراك هذه الفرميونات مع الكواركات واللبتونات ـــ الجسيمات الأساسية للمادة . وبذلك يمكن أن تصبح المادة والقوة متصلتين في مفهوم نظري أوحد .

رغم ما ينطوي عليه هذا البناء الفخم من إغراء ، يبقى أن اكتشاف أنداد الغرافيتون الفائقة من ضمن الجسيمات المعروفة مجرد حلم جميل . ومع ذلك يبدي بعض النظريين من الحماس ما يكفي للادعاء بأن الثقالة الفائقة يمكن أن تكون طريق البحث عن نظرية كل شيء . وقد قال ستيفن هوكنغ ، في خطابه بمناسبة تسنم كرسي الرياضيات في جامعة كمبردج ، إن « نهاية الفيزياء النظرية أصبحت في مرمى البصر » بموجب ما تطرحه الثقالة الفائقة N = 8 من أمل عظيم .

وقد بذلت جهود كثيرة للتدقيق في النظرية وتحري ما يتفرع عنها . كما جرى أيضاً تطوير نسخ تناظر فائق في نظريات حقلية أخرى أسهل على التحليل من الثقالة ، وذلك لاستخدامها في عمليات تشابه . وقد تبين في سياق تطوير هام أن البنية الهندسية للثقالة الفائقة تصبح أبسط بكثير إذا أُعيدت صياغة النظرية في زمكان ذي أكثر من أربعة أبعاد . وأفضل عدد بهذا الصدد هو 11 من أجل الثقالة الفائقة N = 8 .

وفي أثناء انشغال بعض النظريين ، في أوائل الثمانينيات ، بإعادة صوغ الثقالة الفائقة في 11 بعداً ، عمد آخرون إلى إجراء تطوير مواز بدراسة إدخال أبعاد إضافية في إطار نظرية كالوزا ـــ كلاين ، التي لم تكن تتناول غير الثقالة والكهرطيسية ، وذلك بهدف إدخال القوة الضعيفة والقوة الشديدة أيضاً فيها . فقد أصبح ذلك ممكناً لأن نظريات واينبرغ وعبد السلام والكرومودیناميك الكمومي زودت هاتين القوتين بصفات حقل عياري تشبه الكهرطيسية جداً .

كانت الكهرطيسية ، في النسخة الأولى لنظرية كالوزا ـــ كلاين ، قد دخلت بفضل إضافة بعد جديد واحد إلى الزمكان ، فأصبح مجموع الأبعاد خمسة . وسبب ذلك الحاجة إلى نوع فوتوني واحد لحمل القوة الكهرطيسية ؛ وهذا بدوره يتصل بواقع أن التناظر العياري للحقل الكهرطيسي تناظر من أبسط الأنواع ( التناظر U(1) ) . لكن للقوتين ، الضعيفة والشديدة ، تناظرين عياريين أكثر تعقيداً ( هما SU(2) و SU(3) ) ويتطلبان العديد من الجسيمات الحاملة لهما . وهذا يتطلب أكثر من بعد إضافي واحد فوق ما يوجد في نظرية كالوزا ـــ كلاين ذات الأبعاد

الخمسة . وكان أن تبين ، هنا أيضـاً ولدى جمع هذا كله ، أن مجموع أبعاد الزمكان يجب أن يكون 11 .

لكن نظرية كالوزا ــ كلاين في 11 بعداً لا تحوي سوى قوة واحدة ، هي الثقالة . أما القوى الأخرى ، الكهرطيسية والضعيفة والشديدة ، فليست سوى ذيول للقوة الثقالية . فنظرية كالوزا ــ كلاين أصبحت ، في 11 بعداً ، نظرية في قوى الطبيعة هندسيةً تماماً ضمن إطار موحد . وهنا تتطابق التناظرات العيارية التجريدية ، الحاسمة في صياغة نظرية حقل كمومية ناجحة ، مع التناظرات الهندسية في زمكان أكثر أبعاداً .

إن المصادفة التي قضت ببرزو 11 بعداً من كلتا النظريتين ، الثقالة الفائقة وكالوزا ــ كلاين ، تبدو موحية جداً ، وقد بدأ الفيزيائيون يتكلمون جدياً عن نظرية واحدة في كل شيء تستخدم التناظر الفائق وعدداً كبيراً من الأبعاد . وقد أصبحت الأبعاد الاضافية ، بعد أن كانت وسيلة رياضية بحتة لدى أصل تطبيقها على الثقالة الفائقة ، تُعتبر كأبعاد فيزيائية حقيقية ملتفة كلها في حيز بالغ الصغر على غرار ما أنبأت به نظرية كالوزا ــ كلاين الأصلية .

لكن نظرية الأبعاد الأحد عشر تشكو ، لسوء الحظ ، من صدع تبين أنه قاتل . ذلك أن إحدى الصفات المميزة للتفاعل الضعيف هي أنه يكسر التناظر المرآتي يميناً ــ يساراً ( أي أنه يخرق قانون المماثلة ، كما ذكرنا في الفقرة ١ ــ ٨ ) . وهذا يستلزم منح الجسيمات العنصرية يدوية ، أو « لولبية chirality » معينة ( يمينية أو يسارية ) . ونحن ، في الحياة اليومية ، نرى أن الفرق بين اليدوية اليمينية واليدوية اليسارية أمر مسلم به ، لكن وجود اللولبية يتصل فعلاً بخصائص عميقة للفضاء ذي الأبعاد الثلاثة . ومن ذلك ينتج أن في الفضاءات التي لها عدد أبعاد **فردي** حصراً ، يوجد لولبية معينة . وهذا يعني أن الفضاء يجب أن يكون ذا عدد أبعاد فردي ، ومن ثم ، أن يكون للزمكان عدد أبعاد زوجي . وإلا كانت اللولبية غير موجودة في قوانين الطبيعة . وبمختصر القول ، إن الزمكان ذا الأحد عشر بعداً لن يكون صالحاً في هذا الصدد .

## ١ ــ ١٢ . المطاعن الرياضية

لقد ألمحنا ، في مناسبات عديدة سابقة ، إلى مسائل التماسك الرياضي لدى صياغة الأوصاف الكمومية للقوى . وفي هذه الفقرة نفحص بشيء من التفصيل طبيعة هذه المشاكل الرياضية .

لقد برزت أولى معالم هذه الصعوبات مع نظرية الحقل الكمومية في النظرية الكهرطيسية التقليدية . كانت إحدى هذه الصعوبات تخص بنية الإلكترون . كانت الصورة الأولية للإلكترون

كرية صغيرة صلبة ذات شحنة كهربائية موزعة فيه بالعدل والقسطاس. ولما كانت الشحنات المتماثلة متنافرة، يكون من شأن شحنة إحدى المناطق في الإلكترون أن تنفر من شحنة المناطق الأخرى، مما يخلق قوى تنافر تسعى إلى تفجير الإلكترون شظايا في الفضاء. زد على ذلك أن قانون تناسب القوة عكسياً مع مربع المسافة (قانون كولون) يجعل هذه القوة عظيمة الشدة جداً إذا كان نصف قطر الإلكترون صغيراً جداً.

فللحيلولة دون تفجر الالكترون لا بدّ من قوى داخلية تقوم بهذه المهمة. وقوى الصر هذه مطلوبة بالشدة اللازمة بالضبط لموازنة نزوع شحنة الإلكترون إلى التصدع في كل آن، مهما كانت حركته. لكن تبين أن نمذجة هذا الفعل الموازن بطريقة تنسجم مع نظرية النسبية الخاصة عمل لا أمل فيه. ولذلك قرر الفيزيائيون أن هذه المسألة يجب أن توضع على الرف، على فرض أن الإلكترون، في حقيقته، كائن نقطي، أي قطره معدوم وليس له، من ثم، أجزاء داخلية يطبقون عليها نظرية ميكانيكية.

لكن هذه الفكرة لم تحلّ مشكلة إلا على حساب بروز مشكلة أخرى، لأننا الآن أمام صعوبة تخص الطاقة الكهربائية الراكدة للإلكترون. والطاقة المطلوبة لتجميع شحنة على كرة نصف قطرها r متناسبة مع $\frac{1}{r}$. فإذا كان متاحاً لـ r أن يصبح صفراً تكون الطاقة لا نهائية العظم. لكن للطاقة كتلة في نظرية النسبية الخاصة، وهذا يستدعي أن يكون للإلكترون كتلة لا نهائية العظم على حساب طاقته الكهربائية الراكدة الذاتية اللانهائية العظم.

ورغم أن وجود حد لا نهائي العظم (سنقول أيضاً «تباعدياً divergent») في المعادلات أمر مربك جداً، إلا أنه لا داعي لاعتباره كارثة إذا كان ذلك الحد لا ينتمي بنفسه إلى مقدار يمكن قياسه. والطاقة التي من هذا القبيل في الفيزياء غير الثقالية ليست مقداراً يمكن قياسه، بل الفروق الطاقية فقط. وللمرء عندئذ الحرية في نقل نقطة الصفر على سلّم الطاقة بوساطة مقدار لا نهائي يجعل الكتلة المرصودة للإلكترون محدودة. وهذا التغيير في السلم معروف باسم **إعادة الاستنظام** renormalization. والنظرية التي يُحصل فيها على أجوبة محدودة، برغم احتوائها على لا نهائيات في بعض المراحل، توصف بأنها **قابلة لإعادة الاستنظام** renormalizable.

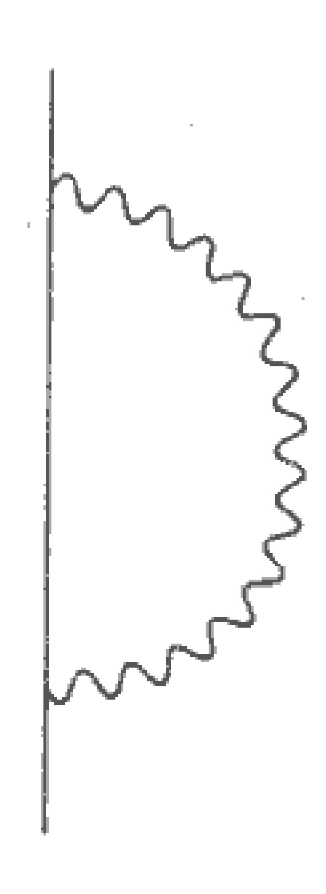
لقد بدأ، في الثلاثينيات، العمل في الميكانيك الكمومي، وهو نظرية تهتم بتفاعل الإلكترونات مع الفوتونات حوامل القوة الكهرطيسية. وفي هذه النظرية يقود الانفعال الذاتي الكهرطيسي للإلكترون إلى نتيجة أبعد غوراً. فقد تبين أن الصعوبات مع اللانهائيات فيها أشد

قسوة مما كانت في النظرية التقليدية . ذلك أن القوى الكهرطيسية في الميكانيك الكمومي تنتقل بوساطة تبادل فوتونات . وينشأ الانفعال الذاتي ، في هذا السياق ، كنتيجة لفوتون يُصدره الجسيم المشحون ثم يمتصه من جديد . وبرغم صعوبة تصور ذلك يُنجدنا مبدأ هايزنبرغ الارتيابي بضرورة أن نتصور أن ذلك الفوتون يحوم فعلاً حول الجسيم المشحون ؛ ذلك أن موقع الفوتون وحركته ضبابيان . وقد مثلنا هذه العلمية بمخطط فاينمان المرسوم في الشكل ١٧ .

إن حلقة الفوتون المتعرجة تمثل طاقة كهرطيسية تحيط بالإلكترون . وهذه الطاقة تسهم في كتلة الإلكترون كما في الإلكتروديناميك التقليدي بالضبط . فإذا افترضنا ، مرة أخرى ، أن الإلكترون نقطي يصبح مقدار الطاقة التي تحملها هذه الفوتونات غير محدود . ويمكن استنباط تفسير ذلك من فحص مبدأ الارتياب بخصوص الطاقة . فكلما كانت المسافة التي على الفوتون أن يقطعها صغيرة ، كان الزمن اللازم لقطعها صغيراً ، ومن ثم كان الارتياب في طاقته كبيراً . ومن أجل جسيم نقطي لا يحتاج الفوتون ، في رحلة الخروج والعودة ،إلى زمن البتة ، وبذلك يمكنه أن يمتلك طاقة لا نهائية . وتبيِّن الحسابات أن الالكترون يستمد كتلة لا نهائية من الفوتونات الحائمة حوله .

لكن حيلة إعادة الاستنظام أصعب بكثير جداً في التطبيق هنا . وذلك ، أولاً ، لأن مقادير لا نهائية أخرى ( كشحنة الإلكترون ) تظهر أيضاً في النظرية ، ويجب أخذها بعين الرعاية . وثانياً أن الشكل ١٧ يمثل إسهاماً لا نهائياً واحداً فقط في كتلة الالكترون . لكن هناك أيضاً حدوداً

**شكل ١٧** . إلكترون يُصدر فوتوناً ويعاود امتصاصه . إن أمثال هذه العملية «تكسو» الالكترون بغيمة من طاقة كهرطيسية . لكن الحساب يُظهر أن الطاقة الكلية لا نهائية الكبر .



تباعدية تنشأ عن إصدار فوتونين ، وثلاثة ، وأربعة ، ... والواقع أن في هذا الشأن سلسلة لا تنتهي من الحدود اللانهائية . ولمواجهة ذلك يبدو أن لا بدّ من سلسلة لا تنتهي من عمليات استنظام منفصلة . فإذا كان الأمر كذلك تكون النظرية عديمة الجدوى وضوحاً . وتتطلب معالجة هذا الداء تحريات رياضية كبيرة للبرهان على أن نوعاً واحداً فقط من إعادة الاستنظام يزيل كل هذه اللانهائيات دفعة واحدة من كل المقادير القابلة للقياس . وقد استلزمت هذه التحريات زهاء عشرين عاماً قبل إعلان أن نظرية الإلكتروديناميك الكمومي قابلة لإعادة الاستنظام . وهذه خاصية نادرة وهامة ، ومن ذوات الصلة الوثيقة بتناظر النظرية العياري .

ليس الإلكتروديناميك الكمومي النظرية الحقلية الكمومية الوحيدة التي نستطيع إعادة استنظامها ، من بين النظريات التي نعرفها ، لكنها أكثرها أهمية وبكثير . فقد تبين أن نبوءاتها دقيقة بشكل مدهش ، وقد استُخدمت نموذجاً لاختراع نظريات أخرى بخصوص القوى . وبخلاف ذلك ، لم تكن نظرية التفاعل الضعيف القديمة قابلة لإعادة الاستنظام ، ولا نظرية الثقالة الكمومية المستندة إلى نظرية أينشتاين النسبوية العامة . ففي كلتا الحالين تتوالى اللانهائيات دون توقف حارمةً النظرية من القدرة على التنبؤ ومن التماسك الداخلي .

وهناك ، مما له صلة وثيقة بمسألة اللانهائيات ، مسألة الشذوذات anomolies . والشذوذ هو الاسم ، المهذب نوعاً ما ، الذي يُطلق على انكسار لتناظر هام لدى « استكمام quantization » نظرية ما ، أي عندما تعاد صياغة النظرية التقليدية بما يضمن اتفاقها مع أحكام ميكانيك الكم . ووجود الشذوذ يعني أن تناظراً في النظرية التقليدية ، التي حصل الانطلاق منها ، قد خُرق في النسخة الكمومية للنظرية . وبسبب الصلة الوثيقة بين التناظرات وقوانين الانحفاظ الفيزيائية ، يمكن للشذوذات أن تفضي إلى خرق قوانين الانحفاظ المقدسة ؛ أي يمكن ، مثلاً ، أن تكون الطاقة والشحنة الكهربائية غير منحفظتين في الفيزياء الكمومية . وكطريقة « فجة » لمعرفة كيفية حدوث ذلك نسوق مايلي : إن انحفاظ الكمية Q يعني أن معدل تغيرها معدوم . وعملية الاستكمام تتناول ، كما رأينا ، كميات كانت مضروبة بعوامل لا نهائية . يمكن عندئذ أن يحدث لمعدل تغير Q أن يصبح مضروباً بعامل لا نهائي . نحصل عندئذ على الجداء $O \times \infty$ . ومعلوم أن هذه الصيغة لا معنى لها ، لكنها يمكن ، بتعريف مناسب ، أن تمثل كمية محدودة . هذا هو الذي يحدث عندما يحصل شذوذ : يصبح معدل تغير Q غير معدوم ، ويُنتهك قانون انحفاظ Q .

## ١ ـــ ١٣ . النظرية الوترية

إن البحث عن نظرية موحدة ـــ ربما عن نظرية كل شيء ـــ وصلت ، في أوائل الثمانينيات ، إلى مرحلة موئسة وغريبة . لكن بعض المشجعات ، كالتناظر الفائق والأبعاد الإضافية ، ظهرت لتدفع التحريات في طرق واعدة . فمسائل اللانهائيات العويصة ، التي سممت كل محاولات بناء نظرية ثقالية كمومية ، تحسنت معالجتها في نظرية الثقالة الفائقة ؛ هذا على الأقل إن لم نقل قد انحسرت . كما أن تعميم نظرية كالوزا ـــ كلاين فرض طريقة جذابة في العمل على مزج القوى الأربع ، حتى ولو لم تبلغ بعد شأوها . وبمختصر القول أصبح النظريون منفتحين جداً أمام مخططات التوحيد التي تضم الثقالة الفائقة والأبعاد الإضافية معاً . وكان أن بدؤوا عند هذه النقطة يهتمون بالنظرية الوترية .

تعود جذور النظرية الوترية إلى أواخر الستينيات وإلى أعمال غابريسل فينيزيانو G.Veneziano . كان عدة فيزيائيين آنئذ يحاولون العثور على مغزى لكثرة الهدرونات ، تلك الجسيمات ذات التفاعل الشديد فيما بينها والتي كانت تظهر تباعاً في التصادمات العالية الطاقة في المسرعات الجسيمية . كان ذلك قبل أن تتوطد النظرية الكواركية في بناء المادة .

كان الشيء المحير في هذا الشأن هو الهدرونات التي فترة حياتها قصيرة جداً ، من رتبة $10^{-23}$ ثانية . وهي معروفة جماعياً باسم « تجاوبات » resonances ( أو جسيمات التجاوب ) لأنها ، كما هو واضح جداً ، ليست جسيمات أولية ، بل إنها تبدو بالأحرى ضرباً من الحالات المثارة excited لهدرونات أخرى . إذ يمكن أن نتصور أن مكنونات الهدرونات أُثيرت إلى مستويات كمومية طاقية عالية بفعل تصادمات عالية الطاقة . وقد بينت التحريات أن بعض هذه الكائنات ذات سبين عالٍ جداً ( $\frac{11}{2}$ مثلاً ) . وفوق ذلك تم العثور على علاقة نظامية بين سبين هذه الهدرونات وكتلتها .

فلتفسير هذه الوقائع اقترحت فينيزيانو نموذجاً وفق مقتضى الحال . لم يكن هذا العمل وقتئذ سوى إجراء رياضي خال من أية صورة فيزيائية . لكن اتضح ، في سياق التحريات اللاحقة ، أن نموذج فينيزيانو يحوي أوصاف حركة وتر كمومية . فكان ذلك خروجاً ملحوظاً من أُطر النظريات السابقة التي كانت تُصِرُّ كلها على نمذجة المادة بلغة الجسيمات . هذا رغم أن النموذج الوتري كان ، في بعض جوانبه على الأقل ، على وفاق مع التجربة أحسن من وفاق النموذج الجسيمي .

يوجد على الاقل جانب واحد يمكن أن يبرر نظرية وترية في الهدرونات . فالمعلوم اليوم أن الهدورنات تحوي كواركات ، وهذه الكواركات تتفاعل بوساطة قوة فيما بينها . ويستطيع المرء أن

يتمثل الروابط الناجمة عن هذه القوة وكأنها قطع مطاطية تصل بين الكوراكات. لأن القوة بين الكواركات تشترك مع توتر المطاط بخاصة أنهما، كليهما، يشتدان بازدياد المسافة. والقوة في حال الكواركات شديدة لدرجة أن طاقة التفاعل تضاهي طاقة كتلة الكواركات السكونية. وفي هذه الظروف يكون «المطاط» في العملية الدينامية أهم من الكوراكات في الأطراف. وعلى هذا فإن النموذج الوتري لدينامية الحركة ليس شيئاً غير ملائم.

لم يكن في ذلك الوقت المبكر يوجد أحد يرى في النموذج الوتري أكثر من عملية تقريبية فجة. وقد بدا، كمشكلة أخرى، أنه مقصور على توصيف البوزونات فقط. لكن بعض النظريين درسوا النموذج بعناية وعثروا على نتائج تخص مقدرة النظرية. ففي عام ١٩٧٠ اكتشف شوارتز J.Schwarz ونوفو A.Neveu نظرية وترية ثانية تحوي أوصاف الفرميونات.

**وفي حوالي ١٩٧٤ حصل تطوير للكروموديناميك الكمومي وتوقف الاهتمام بالنظرية الوترية** كنموذج للهدرونات. وكان يمكن أن تموت لولا أن اكتشف شوارتز وشريكه شيرك J.Scherk إمكان استخدامها في مجال آخر أكثر أهمية بكثير. فقد كان من مشكلات النظرية المبكرة أن الجسيمات التي بدت مستمدة منها تحوي جسيماً عديم الكتلة وسبينه 2. ولم يكن في تشكيلة الهدرونات أي شيء من هذا القبيل. لكن هذا الجسيم له أوصاف الغرافيتون بكل دقة ــ الجسيم الحامل للثقالة. فهل النظرية الوترية هي حقاً نظرية ثقالية؟ كما ادعى شيرك وشوارتز، أو حتى نظرية كل شيء.

لقد كان على هذه الفكرة الجريئة أن تنتظر زهاء عشر سنوات كي تكتسب مصداقية أوسع. وفي أثناء ذلك عكفت مجموعة صغيرة من النظريين، فيها جون شوارتز وميكائيل غرين M.Green، على دراسة كل أنواع مسائل التماسك الرياضي ــ التاخيونات واللانهائيات والشذوذات والحاجة إلى أبعاد إضافية وإلى تناظر فائق. ومن سخرية القدر أن أعمالهم كانت تعتبر مضيعة للوقت في نظرية معتوهة. لكن كل ذلك تغير اليوم. فقد أصبحت ــ بصورتها الحديثة المعروفة **باسم نظرية الأوتار الفائقة** ــ تلفت انتباه نفر من أمهر الفيزيائيين النظريين في العالم.

وسنطلع، في الفصول القادمة ومن بعض رواد النظرية الوترية بمن فيهم شوارتز وغرين، على أحاديث عن أوصاف هذه النظرية بالتفصيل. سيعرضون نتفاً من تاريخها، وموقعها الراهن وكيف يتوقعون تطوراتها المستقبلية. وسيتحدثون أيضاً عن المسألة الحاسمة: هل يمكن حقاً للنظرية الوترية أن تتبوأ منصب نظرية كل شيء.

ما من شك في أن النظرية الوترية جذابة بشكل لم يسبق له مثيل. ومن النظريين ثلة تتحدث ببلاغة عما فيها من جمال وغنى غير مألوفين. لكن هناك بلا ريب حافزاً آخر على دراسة

هذا الموضوع نابعاً من أن نظرية الوتر الفائق، إذا اتفق لها أن تقدم بالفعل شرحاً كمياً لكل جسيمات الطبيعة وقواها، ستمثل فتحاً من أعظم الفتوح العلمية في تاريخ الفكر البشري. إذ يمكن عندئذ أن يقال بأنها أوج العلم الاختزالي reductionist، لأننا نكون بذلك قد اكتشفنا، على الأقل، أصغر الكائنات التي صُنع منها هذا العالم ونجحنا في استيضاح المبادئ الأساسية التي يعتمدها هذا الكون في مسيرته الطويلة. فلا غرابة إذن في أن يتخلى رجال العلم، بين عشية وضحاها، عن مشاريع بحوث مقررة ليتفرغوا إلى النظرية الوترية. وفي زمن كتابة هذه السطور يوجد «صناعة» حقيقية تعمل على هذا الموضوع. وقلما تجد، في مجالات الفيزياء الجسيمية والنظرية الثقالية، ندوة علمية أو نشرة صحافية بحثية لا تتعرض بشكل أو بآخر إلى فكرة الأوتار.

ومع ذلك لا يمكن أن نقول إن كل رجال العلم سعداء بهذه الظاهرة. فمنهم من يرى أن جهود النظريين الوتريين قد أخطأت الهدف على صعيد الفلسفة والعلم. حتى إن بعضهم يقولون بأن هذه النظرية هراء بحت. وقد فسحنا لمثل هذه الانتقادات مجالاً في المقابلات القادمة. فاحكم بنفسك، من تعتقد أنه محق. لكن في هذا الأمر شيئاً متفقاً عليه، هو أنك لن تجد في تاريخ العلم مشروعاً علمياً بلغ فيه الرهان ما بلغ على هذه النظرية.

# 2

## جون شوارتز

جون شوارتز أستاذ في قسم الفيزياء بمعهد كاليفورنيا التقاني ( كالتيك Caltech ) . كانت أعماله الأولى ، وخصوصاً تلك التي قام بها بالاشتراك مع ميكائيل غرين ، هي التي دفعت الموضوع من الركود النظري إلى مصاف نظرية عصرية فعالة في الأوتار الفائقة .

**إن فكرة استخدام الأوتار لنمذجة الجسيمات الأساسية تعود إلى ماض بعيد بعض الشيء . فهل لك أن تحكي لنا نبذة عن الأيام الأولى للنظرية الوترية؟**

للنظرية الوترية قصة غريبة جداً . الموضوع يعود إلى محاولة حل مسألة مختلفة تماماً عن المسألة التي تُستخدم من أجلها هذه النظرية اليوم . فقد أُنشئت في الأصل ، بين عامي ١٩٦٨ — ٧٠ تقريباً ، كمحاولة لفهم القوة النووية الشديدة . وكان أن أصابت قدراً من النجاح في هذا السبيل ، لكن نجاحها لم يكن كاملاً ، وظهرت في أواسط السبعينيات نظرية أخرى ، اسمها الكروموديناميك الكمومي ، نجحت في وصف التفاعلات الشديدة . وبنتيجة ذلك ، وبالرغم من حصول قدر هائل من العمل في النظرية الوترية أثناء تلك المرحلة المبكرة ، هجر معظم الناس الموضوع في أواسط السبعينيات عندما أنشئ الكروموديناميك الكمومي . وأنا لم أفعل ذلك لأنني ، قبل نشوء الكروموديناميك الكمومي أو في أثناء ذلك تقريباً ، كنت أعمل مع فيزيائي فرنسي ، اسمه جوئيل شيرك J.Scherk ، كان في زيارة هنا ، في كالتيك ؛ وقد لاحظنا أن المشاكل التي كنا نواجهها في النظرية الوترية ، لدى محاولة استخدامها في توصيف القوة النووية الشديدة ، تعود إلى أن النظرية كانت تقود دوماً إلى نوع جسيمي خاص لم يكن له مكان في النظام النووي الشديد . كان بالتحديد جسيماً عديم الكتلة ويملك وحدتين من الاندفاع الزاوي ( السبين ) ، ولم يكن يوجد في العمليات النووية أي شيء يستجيب لهذه الأوصاف . لكننا كنا نعرف أن هذا كان بالضبط النوع الجسيمي في نظرية أينشتاين النسبوية العامة ، وهي نظرية في الثقالة ، وأن هذا الجسيم ليس سوى

الذي يُدعى عادة غرافيتون ـــ الجسيم الذي يحمل، في ميكانيك الكم، القوة الثقالية. والثقالة شيء مختلف جداً عن القوة النووية الشديدة. كما أنها في الظروف العادية أضعف منها بكثير، كثير جداً. وبما أننا وجدنا أن هذا الجسيم موجود في نظريتنا بشكل ما، قررنا أن علينا أن نتخلى عن مشروع استخدام الأوتار لتوصيف القوة النووية الشديدة وأن نفحص إذا كان بالإمكان استخدامها لتوصيف الثقالة في آن واحد مع قوى أساسية أخرى تبين أنها تقع على هذا الطريق.

**شر تحول إلى خير، في الواقع.**

صحيح. لقد تطلب ذلك إعادة نظر جذرية إلى حدٍ ما، لأنه أسفر، من جهة أولى، عن أن الأوتار يجب أن تكون أصغر بكثير مما كنا نظن في البدء.

**ما نوع الحيِّز الذي نتكلم عنه الآن؟**

عندما كنا نفكر بالأوتار كنموذج لأوصاف الجسيمات النووية، كانت الفكرة أن الأوتار يجب أن يكون لها «مقاس» يلائم النواة تماماً، وهو $10^{-13}$ سنتيمتراً. وعندما نستخدمه للثقالة يوجد سلم أطوال طبيعي توحي به بنية الثقالة. وهذا ما يُدعى طول بلانك، وهو أصغر لدرجة لا تصدق من السلَّم النووي ـــ أصغر ب $10^{20}$ مرة. وللتعبير عن ذلك طريقة تقول بأن نسبة سلم بلانك إلى «مقاس» الذرة كنسبة هذا إلى مقاس المنظومة الشمسية. فنحن إذن أمام مسافات بالغة الصغر حين نناقش الأوتار المستخدمة لتوحيد الثقالة مع القوى الأخرى.

وهكذا برز استخدام الأوتار من أجل الثقالة والتوحيد، عام ١٩٧٤، بعد أن طرأ على النظرية الوترية تطوير استغرق خمس سنين. وقد ثابرت مع شيرك، الذي مات ميتة مأساوية جداً بعد ذلك بست سنوات، على العمل في هذه المسألة، وبدأت عام ١٩٧٩ أتعاون مع غرين، من معهد الملكة ماري في لندن.

**قبل أن ننتقل إلى هذه التطويرات هل لي أن أسألك ما نوع الصورة التي لديك عن النترونات والبروتونات في النظرية الوترية القديمة؟ هل هي بمعنى ما وتر يُفترض وجوده ضمن النترون والبروتون؟**

حسن، بكلام تقريبي، كانت الصورة أن الهدرون، كالنترون والبروتون، مصنوع من كواركات، وهي فكرة أدخلها غيل ـــ مان Gell-Mann وزوايغ قبل زهاء عشرين عاماً. وعلى هذه الكواركات أن تكون مضمومة معاً بقوة ما، وبذلك كانت الصورة أن الأوتار وصف للقوة التي تمسك بالكواركات معاً، على شاكلة نتف من المطاط. ويمكن للمرء أن يفكر بالكواركات وكأنها مربوطة عند أطراف هذه الأوتار.

**وأن المجموعة كلها تدوّم معاً بطريقة ما.**

هذا صحيح.

**ماهي الصعوبات الرئيسية في هذه الفكرة؟**

كان فيها عدة صعوبات، واحدة ذكرتها منذ قليل: ذلك الجسيم العديم الكتلة ذو السبين 2 الذي تفرزه الرياضيات إلزامياً ولا ينتمي إلى مجموعة الجسيمات التي نصادفها في العمليات النووية.

الصعوبة الأخرى، الأقرب إلى الطرافة، هي أن تماسك النظرية رياضياً يتطلب أن يكون الزمكان ذا أبعاد أكثر من أربعة. كانت النظرية الوترية الأصلية، التي تنطوي على نقائص أخرى، تقود إلى ستة وعشرين بعداً. وفي نظرية وترية مُحسَّنة، أنشأها بيير رامُند P.Ramond وأندره نوفو A.Neuveu وأنا عام ١٩٧١، نزل عدد الأبعاد إلى عشرة؛ والواقع أن نسخة من هذه النظرية ذات الأبعاد العشرة هي الرائجة اليوم. كان وجود أبعاد إضافية مسألة خطيرة جداً في مجال توصيف الجسيمات النووية، لأننا نعلم حق العلم أنه يوجد ثلاثة أبعاد مكانية وواحد زمني، وأن الموقف لا يحتمل مطلقاً أبعاداً إضافية إذا كنا نريد نظرية واقعية.

**هل لديك أمل في إعادة صياغة للنظرية تجعلها متماسكة في أربعة أبعاد؟**

حسن، لقد بُذلت جهود عديدة على مدى هذه السنين ــ لقد كرستُ جزءاً من جهودي في هذا السبيل أيضاً ــ في محاولة العثور على أنواع من هاتين النظريتين منطوية على أربعة أبعاد بدلاً من عشرة أو ستة وعشرين ــ وقد سيقت اقتراحات عديدة في هذا السبيل كانت كلها تنطلق من منظومة رياضية جميلة جداً تصبح قبيحة حقاً وغير مقنعة، وتقود بشكل محتوم إلى اختلالات رياضية.

**كان وجود التاخيونات إحدى المسائل الأخرى في سياق النظرية الوترية الأصلية، وهي جسيمات تسير بأسرع من الضوء. ألم يمكن تحاشي ذلك؟**

هذه سمة لا يمكن تحاشيها في النظرية الوترية البوزونية التي فيها ستة وعشرون بعداً. وإحدى مزايا النظرية التي لها عشرة أبعاد هي إمكانية انتخاب نسخة منها لا تحوي أياً من هذه الجسيمات التاخيونية التي نعرف أنها لا تتفق مع المبادئ الأساسية.

**لقد أصابت النظرية الوترية القديمة بعض النجاحات أيضاً، على ما أظن.**

نعم. لقد أُنشئت هذه النظرية لأسباب وجيهة. وقد فازت بعدة صفات عامة كنا نعلم أننا نستهدفها في نظرية تخص القوة النووية الشديدة ــ صفات بخصوص كيفية تفاعل الجسيمات في

الطاقات العالية ومايتصل بذلك من أشياء ككتل شتى الجسيمات وعزومها الزاوية ونماذج العلاقات فيما بينها .

**إذا ألقينا نظرة إلى الوراء ، هل يصح ، إلى حد ما ، أن نقول إن على المرء أن لايرى بتاتاً بعد الآن في الأوتار أوصاف الجسيمات النووية ، وأن الكروموديناميك الكمومي متفوق عليها في هذا الميدان ؟**

إن جمهور رجال العلم يعترفون بالكروموديناميك الكمومي كنظرية صحيحة في القوة النووية الشديدة . وأرى أن أسباب ذلك واضحة جداً . لكن يبدو مع ذلك من المعقول تماماً أن بالإمكان إعادة صياغة الكروموديناميك الكمومي بشكل يجعل الأوتار تبدو ذات دور مهم . لكن الأوتار التي ستنبثق في هذا الظرف لا بدّ أن تسلك سلوكاً رياضياً مختلفاً عن سلوك الأوتار التي اقتُرحت قبل خمسة عشر عاماً . والبنية الصحيحة لنظرية من هذا القبيل لم تُقترح إلا بشكل غامض فيما نعرفه اليوم . وفي الواقع يبدو أننا أمام مسألة أصعب بكثير من تلك التي تبدو أكثر طموحاً بكثير ـــ نظرية الوتر الفائق التي نعمل فيها اليوم .

**ماذا كانت نقطة الانعطاف الحقيقية في مسيرة النظرية الوترية ، أي الشيء الذي وضعها في مقدمة البحوث في فيزياء الجسيمات ؟**

كانت نقطة البدء تعاوني مع ميكائيل غرين عام ١٩٨٠ ، حين استأنفنا العمل الذي كنت بدأته مع جوئيل شيرك بخصوص تطوير السلوك الرياضي المفصَّل للنظرية الوترية ذات الأبعاد العشرة . والذي أريد أن أشير إليه من صفات هذه النظرية صفة هامة هي أنها ذات نوع من التناظر خاص جداً يسمى التناظر الفائق وله علاقة بصنفين من الجسيمات العنصرية يُدعيان بوزونات وفرميونات .

**هل لك أن تقول شيئاً عن ماهية هذين النوعين من الجسيمات ؟**

إن كل الجسيمات العنصرية تقع في صنفين مختلفين . وجسيمات أحد الصنفين ، البوزوني والفرميوني ، تختلف عن جسيمات الصنف الآخر بفرقين هامين : بقيمة العزم الزاوي الذي يحمله الجسيم ، وهو الذي يسمى عادة «السبين» ؛ وسبينات البوزونات أمثال زوجية من وحدة أساسية ، في حين أن سبينات الفرميونات أمثال فردية من تلك الوحدة نفسها .

الفرق الآخر ، وهو ذو صلة وثيقة جداً بنتائج ميكانيك الكم ، مستمد من سلوك النظرية إزاء حدوث تبديل بين جسيمين ، فإما أن تبقى على حالها إزاء هذا التبديل ، أو أن تكتسب إشارة سالبة . الفرميونات تسبب هذه الإشارة السالبة .

**تقول إن التناظر الفائق وسيلة مزج لهذين النوعين من الجسيمات في توصيف مشترك.**

نعم هذا صحيح. وربما يجب أن أقول، ليكون التعبير أقل تجريداً، إن الكواركات والإلكترونات فرميونات وإن الفوتونات والغرافيتونات بوزونات.

**هل يصح القول بأن الفرميونات جسيمات المادة، والبوزونات جسيمات تنقل القوى بين جسيمات المادة؟**

أعتقد أن ذلك طريقة جيدة للتعريف.

**كنت تقول إن التناظر الفائق عنصر جوهري في النسخة الحديثة للنظرية الوترية. فإلى أين قادت هذه التطويرات؟**

حسن، إنها سلسلة طويلة من التفرعات. الواقع أن النظرية الوترية ذات الأبعاد العشرة التي جاءت عام ١٩٧١ كانت بالفعل ميلاد نظرية التناظر الفائق. كان أحد مظاهر ذلك تعميم نظرية الثقالة على التناظر الفائق، وهي نظرية تدعى الثقالة الفائقة وقد أنشئت عام ١٩٧٦ وأُدخلت في النظرية الوترية الفائقة التناظر، المعروفة أكثر باسم نظرية الوتر الفائق.

لدى دراسة خصائص النظرية الوترية الفائقة التناظر وجدتُ، بالتعاون مع غرين، عدداً من الأشياء على مدى السنين التي نعتقد أنها كانت مثيرة جداً. فإحدى المسائل البالغة الأهمية التي كانت على الدوام تعترض صنع نظرية ثقالية هي أن محاولة التوفيق بينها وبين مستلزمات نظرية الكم تنطوي على حسابات تقود دوماً إلى صيغ تباعدية عديمة المعنى، شيء من نوع يشبه تقسيم الواحد على الصفر، وهي عملية لا يمكن إجراؤها. وهكذا كان يُحصل على أجوبة لا معنى لها لدى محاولة إجراء حسابات كمومية في الثقالة. كان ذلك يبدو سمة تشترك فيها كل النظريات التي كانت تعتبر الجسيمات الأساسية نقطاً رياضية، وهي الطريقة التقليدية في معالجة هذه الأشياء.

وعلى هذا فإن الشيء المهم في النظرية المهمة هو أنها استبدلت بالنقاط منحنيات ذات بعد واحد تسمى أوتاراً. والشيء الذي وجدناه مثيراً للحماس هو أننا، عندما حسبنا التصحيحات الكمومية للثقالة في النظرية الوترية، بدأنا نحصل على أعداد ذات معنى فعلاً، أعداد تخرج من صيغ منتهية. كان ذلك أول دليل على إمكانية صنع نظرية متناهية تتفق مع ميكانيك الكم وتحوي الثقالة. كان ذلك مغرياً، وقد قمنا به في غضون عام ١٩٨٢.

وفي الوقت نفسه تقريباً وجدنا نظريتين في الأوتار الفائقة. إحداهما، التي طورناها، تحوي ما نسميه الأوتار المفتوحة (للوتر نهايتان حرتان). والأخرى ذات أوتار مغلقة بشكل حلقات.

وعلى هذا فإن النظرية الوترية الفائقة الأصلية ذات وترين، مفتوح ومغلق. لكننا اكتشفنا بعد مدة أن بالإمكان صنع نظريات ذات أوتار مغلقة فقط. وقد تبين أنها ذات ميزة هامة، وهي وحدها التي تنطوي على أحسن البشائر. والواقع أنها فعلاً أبسط دراسةً من عدة وجوه.

إن في الطبيعة حقيقة من أهم الحقائق التي نريد أخذها في الحسبان في نظريتنا الأساسية وهي وجود تمييز بين اليدوية اليسارية واليدوية اليمينية. فيجب أن لا تكون النظرية ذات تناظر مرآتي ـــ وهذا ما يُعرف باسم انتهاك المماثلة. وهي خاصية هامة موجودة في النموذج المتعارف عليه في التفاعلات الضعيفة والشديدة، النموذج الذي نعرف أنه ينطبق في الطاقات المنخفضة. وفهم هذا اللاتناظر من وجهة نظر أساسية يشكل تحدياً، لاسيما في ظروف النظرية الوترية الفائقة.

لقد تبين أن واحدة فقط، من العدد القليل للنظريات الوترية الفائقة التي أُنشئت حتى الآن، لا تحترم التناظر المرآتي كصفة أساسية في الأبعاد العشرة. وهذا مشجع جداً. لكن النظريات التي تنطوي على هذا اللاتناظر المرآتي سريعة العطب جداً وتعطي أجوبة غير منطقية، ولا نعني بذلك اللانهائيات التي ذكرتها قبل قليل، بل مسائل ذات صلة بها تسمى الشذوذات. والصورة، في الأساس هنا، هي أن النظرية تملك، قبل أخذ ميكانيك الكم بعين الاعتبار، خاصية تناظرية أساسية ما؛ والسؤال الذي تجب الإجابة عنه هو: هل تحترم التصحيحات الكمومية ذلك التناظر أم تكسره؟ فإذا كسرته تكون النظرية غير منطقية ولا معقولة. هذا التضارب يحدث دوماً عندما نكون إزاء نظرية غير ذات تناظر مرآتي(*). فلئن كان امتلاك نظريات غير ذات تناظر مرآتي أمراً يثير الحماس، فقد يكون أيضاً نذير شؤم لأن من المحتمل أن تنطوي على تلك الشذوذات التي تجعلها غير منطقية.

في عام ١٩٨٤ أجريتُ مع غرين حساباً من أجل واحدة من النظريات الوترية الفائقة لنعرف إذا كان هذا الشذوذ يحدث أم لا. فكان الذي اكتشفناه شيئاً أدهشنا. لقد وجدنا أن هناك بالفعل عموماً شذوذاً جعل النظرية غير مُرضية. لكن المرء له الحرية في اختيار البنية التناظرية الخاصة التي يستخدمها في المقام الأول لتحديد النظرية. فالواقع أن هناك عدداً لا نهائياً من الإمكانيات بخصوص هذه البنى التناظرية. لكن الشذوذ يختفي من الدساتير، بفعل سحري،

---

(*) نذكر لزيادة الإيضاح أن النظريات الكمومية تتعامل عادة مع تابع (دالّة)، بالمعنى الرياضي، تُستنتج منه خصائص جملة مدروسة، جسيماً كانت أو مجموعة جسيمات. فإذا عكسنا الإشارة الجبرية لكل متحول مكاني في التابع ولم تتغير أشارته يقال عن النظرية إنها ذات تناظر مرآتي (أو مماثلة زوجية)، وإذا انعكست إشارة التابع يقال عن النظرية إنها غير ذات تناظر مرآتي (أو ذات مماثلة فردية). (المترجم)

في واحدة منها فقط، في حين أنه لا يختفي في حالة البنى الأخرى كلها. وهكذا، فمن بين هذه الإمكانيات اللامحدودة يوجد واحدة فقط تُنتخب على أساس أنها منطقية في مضمونها.

**دعني أوضح ذلك. لدينا نوعان من الأمراض في تناول الجسيمات والقوى الأساسية في إطار نظرية الحقل التقليدية. أحدهما وجود الحدود اللانهائية، والأخرى وجود تلك الشذوذات التي تجلب للتناظر انكساراً ممقوتاً لدى استكمام النظرية. وكلاهما يجعلان النظرية غير متماسكة رياضياً، لكن هاتين المسألتين تبدوان مأخوذتين بعين الرعاية في الأوتار الفائقة شرط أن يجري العمل فقط في إطار هذه النظرية الوترية الفائقة المنتخبة. فبأية طريقة تُنتخب هذه النظرية وحدها؟ ماهي الصفة المختارة في هذا السبيل؟**

ذكرتُ أن البنية التناظرية الخاصة تُنتخب من عدد لا نهائي من الإمكانيات قبل تفحص مسألة الشذوذ. واسم هذه البنية التناظرية SO(32).

وفي الوقت نفسه تقريباً اكتشفنا أيضاً وجود بنية تناظرية ثانية بدت كإمكانية منطقية أخرى واسمها $E_8 \times E_8$. والشيء الغريب كان آنئذ أننا لم نكن نملك نظرية وترية فائقة نوعية يمكن أن تحتوي هذا التناظر. وهكذا كان لدينا نظرية وترية فائقة فيها واحد من التناظرين اللذين عرفناهما، وعندئذ عثرنا على تناظر ثانٍ بدا أنه قد يكون منطقياً لكننا لم نكن نملك نظرية تتماشى معه. بيد أن فريقاً مؤلفاً من أربعة فيزيائيين من جامعة برنستون، يعرفون اليوم باسم رباعي برنستون الوتري، اكتشفوا نظريتين جديدتين أسموهما «الأوتار المتغايرة heterotic». كانت إحدى هاتين النظريتين تحوي التناظر $E_8 \times E_8$، وكانت الأخرى مثالاً ثانياً للنظرية التي تستند على SO(32).

كانت النظرية التي تحوي $E_8 \times E_8$ أكثرهما إثارة للاهتمام، لأن هذه البنية التناظرية تبدو أخصب البنى وعوداً بالانسجام مع الظواهر التجريبية الجسيمية.

**لكن يبدو أننا الآن أمام عدد متفاقم من النظريات الوترية البديلة. أليس هذا شيئاً سيئاً؟**

إن عددها ما يزال صغيراً نسبياً. وسؤالك، من وجهة النظر المثالية، في محله طبعاً. ومن الأحسن حتماً أن توجد نظرية واحدة فقط وأن تفسر كل شيء. وأعتقد أن بإمكاني القول بأننا قد قطعنا شوطاً طويلاً في ذلك الاتجاه، رغم أن الموضوع لم يعد اليوم كما كان. إذ يوجد، في الوقت الحاضر وفي عشرة أبعاد، ثلاث نظريات وترية متغايرة (لقد عُثر على الثالثة مؤخراً بعد الاثنتين المذكورتين منذ قليل) وثلاث نظريات وترية فائقة غير متغايرة ــ ستة حتى الآن. لكن من

الممكن فعلاً أن يتبين ، بتحريات لاحقة ، أن بعضها غير منطقي ؛ فيصبح العدد الكلي أصغر . زد على ذلك أن من المحتمل ، على ما يبدو ، أن تكون النظريات المتغايرة الثلاث في الواقع نسخاً ثلاثاً من نظرية واحدة. فقد يمكن البرهان على أنها متكافئة ، مما يجعلنا نعتبرها نظرية واحدة بالفعل . وبمحاكمة من هذا القبيل يتولد لدينا أمل كبير في إمكانية أن ينخفض هذا العدد إلى نظرية واحدة فقط .

**لماذا لم تعد توجد مشكلة في وجوب أن تصاغ هذه النظريات في أكثر من أبعاد الزمكان الأربعة ؟**

بمجرد أن تخلينا عن البرنامج الهدروني ، برنامج تمثيل القوة النووية الشديدة بأوتار ، وتوجهنا إلى مسألة توصيف الثقالة والقوى الأخرى ، أصبحت الأبعاد الإضافية مزية لا شراً . والسبب هو أن نظريات الثقالة تصف هندسة المكان والزمان . وعلى هذا يتضح أن من المجدي جداً أن نفترض ، في إطار نظرية ثقالية ، أن الأبعاد الإضافية موجودة فعلاً لكنها متكورة على نفسها في كرية متقزمة متينة ، كنتيجة لهندسة تفرضها النظرية نفسها .

ستحوي النظرية إذن أبعاداً إضافية ، لكنها ستقول لنا أيضاً ما يجب أن نفعل بخصوصها ؛ لأنك عندما تحاول حل المعادلات ، وإذا تماشت كلها مع الخطة ، فستكتشف أن حل المعادلات ينطوي على تكور هذه الأبعاد الإضافية الستة في كرية صغيرة لدرجة أن لا نلحظها .

**صغيرة بقدر ماذا؟**

يبدو أنها من سلم الأطوال الذي ذكرته آنفاً ــ طول بلانك ــ تلك المسافة الصغيرة لدرجة لا تصدق ، $10^{-33}$ سنتيمتراً .

**تريد أن تقول إذن إن كل نقطة من الفضاء ، أو ما نظنه نقطة من الفضاء ، هي في الواقع كرية صغيرة ذات ستة أبعاد قطرها حوالي $10^{-33}$ سنتيمتراً . فليس عجيباً إذن أن لا نلحظ هذه الأبعاد الإضافية .**

إنها أصغر من أن يستطاع كشفها .

**كيف يجب أن نتصور هذه الأوتار ؟ هل يجب أن نتصور الجسيمات ، كالإلكترونات والكواركات مثلاً ، على أساس أنها ، بمعنى ما ، مصوغة من أوتار ؟ هل نتصور أنه يوجد ضمنها وتر صغير ؟ حلقة ، أو شيء من هذا القبيل ؟**

حسن ، إليك تعبيراً آخر يختلف قليلاً عما تقول . هب أنك أمام وتر يمكن أن يهتز ويرتجف بأشكال شتى . إن كل شكل من أشكال هذا الرجفان أو الاهتزاز يمكن أن يُعتبر وصفاً لنوع

جسيمي خاص. وعلى هذا تستطيع أن تتصور أن الإلكترون شكل اهتزازي معين، وأن الكوارك شكل اهتزازي آخر، والغرافيتون شكل ثالث، وهكذا.

**نوع وتري في الداخل، لكنه يتحرك بأشكال شتى، بصور حركية متخالفة؟**

نعم.

**لقد ذكرت أن أحسن البشائر موجودة في النظرية الفائقة التي تصاغ بالتعامل مع $E_8 \times E_8$. ما معنى هاتين النسختين من $E_8$؟**

ليس واضحاً تماماً كيف سيكون المنظر بعد أن ينقشع الضباب؛ لكن الإمكانية التي تبدو محيِّرة اليوم هي أن تناظرات فيزياء الجسيمات، كما نعرفها من خلال التجارب في الطاقات الشائع بلوغها، هي جزء من تناظرات واحدة من $E_8$ الاثنتين. أما التناظر $E_8$ الآخر فيصف نوعاً جديداً من المادة، يسمى أحياناً المادة الظلّية shadow matter، تفاعله معدوم، أو بالغ الضعف، مع المادة العادية التي نعرفها. فإذا أردت بناء علم خيالي من ذلك تستطيع أن تتصور أن كل أجناس المجرات والكواكب مصنوعة من مادة ظلية لا نراها بتاتاً لأنها لا تتفاعل مع ضوء من نوع ضوئنا.

وبذلك تكون الامكانية الطريفة أن المادة الظلية المتصلة بثاني التناظرين $E_8$ لا بدّ أن تكون خفية علينا لأنها زاهدة في التفاعل مع ضوء كالضوء الذي نستطيع كشفه.

**هل يوجد مادة ظلية تمر في هذه اللحظة عبر هذه الغرفة ولا نعلم شيئاً عنها؟**

هذا صحيح. إن بإمكانك أن تضع لها حدوداً لأنها تتفاعل حقاً مع نوع ثقالتنا — إننا نقتسم ثقالتنا مع المادة الظلية.

**إذن نستطيع أن نستشعر كوكباً ظلياً؟**

نستطيع أن نستشعره بمفعولاته الثقالية برغم أننا لا نراه بالضوء.

**هل يوجد برهان على وجود هذه المادة الظلية؟**

كلا، لا يوجد. لكنها تتفق مع ما نعلم عن هذا العالم، لأن من الثابت أن المادة المرئية فيه قد لا تشكل أكثر من عشرة بالمئة أو نحوها من كتلة العالم الكلية. وهكذا، حتى لو كان نصف مادة العالم ظلية لكان ذلك معقولاً. فهناك محل لها.

**هل هذا العالم الظلي مطابق لعالمنا كثيراً أو قليلاً في طبيعة جسيماته وتفاعلاتها؟**

تلك مسألة تتوقف على تفاصيل سلوك النظرية. فهناك إمكانية أن يتكسر التناظران E8، منهما بأسلوب واحد، إلى بنى تناظرية أصغر. فإذا كان نموذج هذا الانكسار واحداً لكل من المضروبين E8 يحصل التناظر نفسه الكامن في قوانين الفيزياء من أجل نوعي المادة. واليوم يبدو أكثر احتمالاً أن يحدث هذا الانكسار التناظري بأسلوبين مختلفين للتناظرين E8.

**لماذا يكون ذلك؟ ماالذي يميز أحدهما عن الآخر؟**

لدى محاولة حل معادلات النظرية لا ننجح في العثور إلا على حلول تستدعي، للتناظرين E8، أسلوبي انكسار مختلفين.

**هو إذن انفصال بين العالم والعالم الظلي؟**

نعم، لكن ليس من المستبعد العثور على حلول أخرى تعالجهما تناظرياً.

**الذي أفهمه هو أن إحدى المسائل البارزة الكبرى في برنامج الأوتار الفائقة هي مسألة تحديد الشكل الخاص الذي تتخذه الأبعاد الإضافية الستة في التفافها على نفسها. هل ترى في ذلك عقبة لايمكن اجتيازها أم شيئاً سوف يذعن للرياضيات بعد بضع سنوات؟**

حسن، إن هذا تحدّ كبير، وربما كان إحدى أهم مسألتين أساسيتين في هذا الموضوع اليوم. فإذا علمنا سيماء تلك الأبعاد الستة المكانية، نصبح في وضع جيد لحساب كل أنواع الأوتار التي نريد معرفتها. قد يكون هذا الكلام مدهشاً. لكن هذا الفضاء، كما ذكرت، غير مرئي على كل حال، لأنه أصغر بكثير من أن يُرصد مباشرة. وقد تبين أن تفاصيل هندسته وتوبولوجيته تؤدي بالفعل دوراً حاسماً في تحديد خواص الجسيمات القابلة للرصد في طاقات يمكن بلوغها.

**هل تستطيع أن تعطي مثالاً؟**

يوجد خاصة توبولوجية لهذا الفضاء ذي الأبعاد الستة تدعى عدد أولر Euler، ويمكن أن نتمثله، بالتقريب، وكأنه قياس لعدد الثقوب في ذلك الفضاء. ويتبين أن عدد أولر هذا ذو صلة بعدد المكررات الموجودة في طوائف الكواركات واللبتونات. فقد وُجد أن الكواركات واللبتونات تظهر بشكل زُمر تسمى طوائف. وقد تم اكتشاف ثلاث من هذه الطوائف تجريبياً. لكن سبب وجود ثلاث طوائف من الكواركات واللبتونات ما يزال سراً من الأسرار. ومن الحقائق التي تثير الفضول بخصوص النظرية الوترية هو أن عدد الطوائف الناتج يساوي بالضبط نصف عدد أولر لهذا الفضاء ذي الأبعاد الستة.

**لدينا إذن هنا مثال يُظهر كيف تؤثر توبولوجية أبعاد هذا الفضاء اللامرئية مباشرة في شيء فيزيائي، كعدد الأنواع المختلفة للجسيمات التي نعثر عليها في الطبيعة.**

نعم.

**إن إحدى المشاكل في النظرية الوترية الفائقة هي ما يبدو، في الوقت الحاضر، من عدم وجود نظرية مفردة بل عدد كبير من النظريات تختلف باختلاف الشكل المختار لالتفاف تلك الأبعاد الإضافية. ما هو، على وجه التقريب، عدد الخيارات التي حصلنا عليها؟**

دعني أولاً أعبر عن هذا الشعور بكلمات مختلفة قليلاً. أريد أن أقول إن النظرية واحدة وأن تعددها في حلولها — لنظرية واحدة عدة حلول — ومشكلتنا الكبرى تكمن في محاولة فهم لماذا يجب أن يكون واحد منها، بمعنى ما، أحسن من سواه وأن يفسر الطبيعة أيضاً.

لا يوجد، في المرحلة الراهنة، أية طريقة للاختيار بين هذه الحلول سوى القول بأن أحدها يتفق مع الطبيعة أحسن من غيره، لكن لا يوجد معيار رياضي لاختيار الأحسن.

بيد أن النظرية ليست مفهومة فهماً كاملاً. ونحن ما نزال نبحث عن أحسن صياغة لها. وأقول، بشكل خاص، إننا، في الصياغات الراهنة للنظرية الوترية الفائقة، قادرون فقط على دراستها بتقريبات متنوعة متوالية، وهي طريقة تسمى نظرية الاضطراب. والذي نسعى إليه هو صياغة للنظرية تغنينا عن هذا النوع من التوسع في طريقة التقريبات المتوالية. ولو كنا نملك للنظرية صيغة تعطينا نتائج دقيقة بدلاً من تقريبات متوالية، ربما أمكننا أن نكتشف أن بعض تلك الفضاءات ذات الأبعاد الستة، التي تظهر لدى حل المعادلات في أي مستوى من التقريب نستطيع اليوم دراسته، لا تشكل إطاراً لحلول المعادلات عندما ننظر إليها من وجهة نظر صحيحة.

**إذا أمكن إذن إجراء حسابات دقيقة يمكن بالفعل انتخاب حل وحيد.**

هذا صحيح. وبطريقة التعبير الشائعة يقال إنه يمكن أن توجد مفعولات غير اضطرابية في النظرية تنفي كل الحلول إلا واحداً، أو بعضاً منها.

**وبانتظار ذلك، كم عدد الحلول المتنافسة المختلفة؟**

من الصعب إحصاؤها حقاً، لكنني أعتقد أنها قد تبلغ الآلاف، وربما أكثر.

**وفيما عدا ذلك، ما هي، في رأيك، أبرز مسائل النظرية؟**

صياغة نسختها غير الاضطرابية، أوصافها الدقيقة. فنحن، مع هذه النظرية، في موقف غريب؛ بمعنى أننا نعرف بعض المعادلات لكننا لا ندرك إدراكاً عميقاً حقاً المبادئ الكامنة في أساس

هذه المعادلات . والقصة هنا مستمدة من تاريخ تطوير نظرية أينشتاين الثقالية ــ النسبية العامة . فقد انطلق أينشتاين من مبدأ جميل ، يدعى مبدأ التكافؤ equivalence principle ، وبنى على أساسه بضع معادلات يمكن بعد ذلك دراستها .

ونحن ، في حال النظرية الوترية ، لدينا مجموعة معادلات ؛ لكننا لا نفهم حقاً تعميم مبدأ التكافؤ ، ذلك التعميم المسؤول عن تلك المعادلات . لكن الواضح أن النظرية ذات عمق وجمال كبير في بنيتها الرياضية التي تحوي كل النتائج المذهلة التي نحصل عليها ، وأن فيها مبدأ أنيقاً وجميلاً يجب العثور عليه . وقد بُذلت جهود كثيرة منذ عام أو عامين في محاولة استيضاح هذا الجانب ، وهناك عمل حديث جداً يمكن بالفعل أن يكون دليلاً على الطريق الصحيح ، لكنه ما يزال تمهيدياً جداً ويحتاج دراسة أكثر قبل أن يبلغ مرتبة اليقين .

وهكذا ترى أن مسألة حل النظرية والتوفيق بينها وبين التجربة ليست المسألة الوحيدة ، بل علينا أيضاً ، على الصعيد الأساسي ، أن نُعمق فهمنا للنظرية برمتها .

**على فرض أن النظرية يستمر نجاحها ، أين تتوقع أن يجري التماس مع التجربة ؟ ونحن لدينا حتى الآن أشياء ذات صياغة أنيقة جداً وعُرفت مؤخراً ، لكن النجاح الحقيقي لأية نظرية يقاس بعدد النبوءات التي يمكن اختبارها .**

هذا صحيح بالتأكيد ، ومن المستحيل أن نعرف الزمن اللازم لتحقيق النجاح في هذا السبيل ، إذا كان مكتوباً له النجاح . لكن أملي كبير في العثور على برهان قاطع على النظرية قبل نهاية هذا القرن ، وإن كنت لا أستطيع أن أؤكد ذلك . وما من أحد يعرف كم سيستغرق ذلك . ونحن نطرح هنا نوعاً من المسائل الطموحة جداً بخصوص مشروع طموح جداً ، ولا يوجد أية ضمانة أن ذلك سينجح ، ولو أنه يبدو بالفعل واعداً أكثر بكثير من أي تناوُلٍ سبقه .

**هل من المحتمل أن تتنبأ النظرية مستقبلاً بجسيمات جديدة تكتشفها مسرعات جديدة ؟**

دعنا نفترض أننا نجحنا في فهم المبدأ الأساسي وأننا نستطيع العثور على حل للمعادلات وحيد . يمكن عندئذ أن ندرس بهذا الحل الخواص التوبولوجية لذلك الفضاء ذي الأبعاد الستة . ومن ذلك نستطيع أن نعرف نوع الجسيمات التي يمكن أن توجد في الطاقة المنخفضة ، كما يمكن استخلاص نسب كتلها من خلال اعتبارات توبولوجية ، وكذلك شدات تفاعلها فيما بينها .

هذا هو نوع المعلومات التي نستخرجها من التجارب التي تتم في المخبر . وهناك يقيناً جسيمات لم تُكتشف بعد ، من ذوات الصلة بالتناظر الفائق مثلاً أو بانكسار التناظر . وليس

لدينا في الوقت الحاضر سوى أفكار تقريبية عما يجب أن تكون عليه كتل هذه الجسيمات وبعض خصائصها الأخرى. ولو كان لدينا تكثف نوعي للأبعاد الستة ناجح في تفسير ما نعرفه حتى الآن لأمكن على الأرجح أن نصوغ، في الوقت نفسه، نبوءات بخصوص بعض التساؤلات الأخرى التي يمكن اختبارها تجريبياً.

**لديّ انطباع بأن التقدم لن يحدث إلا إذا تحقق تطور كبير جديد في فهم الخلفية الرياضية ــ وبأنكم تلجؤون إلى بعض فروع الرياضيات الجديدة بذاتها والضرورية لاستمرار التقدم.**

هذا صحيح. ذلك أن أحد جوانب الموضوع كله، الجانب الذي يثير لدى بعض العاملين نوعاً من الرعب، هو أن هذه الدراسات تتطلب قدراً هائلاً من الرياضيات. والواقع أن قسماً كبيراً من هذه الرياضيات لم يستنبطه الرياضيون حتى الآن. وهناك الكثير مما يجب معرفته، والكثير مما يجب تطويره في الرياضيات، في الوقت الذي نحاول فيه فهم الجانب الفيزيائي. إنها فترة حماسية يمر بها المرء حين يسهم في هذا العمل كله، وأنا متفائل بأن كل ذلك سيكون مثمراً على المدى الطويل.

**هناك من يتكلم عن برنامج الوتر الفائق وكأنه نظرية كل شيء، لأن الهدف النهائي للنظرية هو تفسير كل الجسيمات وكل القوى. ويقال غالباً إن تاريخ العلم عرف فترات قيل أثناءها إن نظرية كل شيء أصبحت «عند ناصية الشارع». وقد تبيَّن دوماً أن ذلك كان خطأً حتى الآن. فما حظ مثل هذه المقولة أن تكون صحيحة من أجل نظرية الوتر الفائق؟**

حسن، في كل نظريات التوحيد (الجزئي) السابقة التي نجحت كان التوصيف يستهدف بعض الجسيمات والقوى التي كانت معروفة آنئذ دون سواها. كان الأمل من هذا البرنامج أن يحسب حساب كل القوى بما فيها الثقالة. كان النجاح الكبير حليف توحيد القوتين، الكهرطيسية والضعيفة، في السنين الأخيرة؛ ويجري توسيع ذلك ليشمل القوة الشديدة. وهذا العمل مثير وناجح، لكنه لم يستطع قط أن يدعي الشمولية التامة لأن الثقالة ما تزال خارج تلك الصورة بكل وضوح.

وقد تم في الماضي لتوصيف الثقالة تقديم اقتراحات أخرى لم يكن لها أي حظ من النجاح في حالة القوى الأخرى. وهذا أول اقتراح (حسب معلوماتي على الأقل) لبرنامج يشمل الثقالة وذي ملامح تجعله مرشحاً مقبولاً لتوصيف القوى الأخرى في الوقت نفسه. إنه بناء رياضي ذو حبكة متينة لدرجة أنه ليس شيئاً تستطيع تغييره جذرياً البتة. فإذا نجح في تفسير النتائج التجريبية يصبح من الصعب تصور أن يكون هذا النوع النظري عملية تقريبية لنظرية أحسن ستُكتشف في المستقبل. إنه بناء متين لدرجة أنك إذا فعلت به أي شيء فسيتصدع كله على ما أعتقد.

هو إذن، من وجهة النظر هذه، مختلف عن النظريات التي سبقته. كانت النظريات تُعتبر دوماً، في الماضي، أعمالاً تقريبية، في الطاقة المنخفضة، لنظرية أعمق ستأتي في المستقبل.

**لننظر إلى الموضوع بعين التفاؤل، مفترضين أن كل شيء سيجري على مايرام وأن من الممكن، ربما في نهاية هذا القرن، استصدار نبوءات بخصوص أشياء نستطيع رصدها، وأن الأوتار الفائقة أصبحت موضع ثقة في تمثيل المبدأ الأساسي الذي بُني العالم بموجبه. ماذا عندئذ بشأن الفيزياء النظرية؟ هل تكون قد بلغت نهايتها؟**

أعتقد أن ذلك إمكانية منطقية، لكنها ليست مؤكدة. فمجال فيزياء الجسيمات العنصرية يختلف، في رأيي، عن كل فرع آخر من الفيزياء والعلم في أنه يطرح أسئلة نوعية، وبالتحديد عن ماهية جسيمات الطبيعة الأساسية وقواها وعن القوانين التي تحكمها. وهي مسألة يستطيع المرء مبدئياً أن يجد لها الجواب الصحيح، وهذا كل ما في الأمر. لكن المجالات العلمية الأخرى كلها، على ما يبدو لي، قابلة للتكيف مع الحاجة؛ ففيها يمكن دوماً أن تنطرح أسئلة جديدة.

فبهذا المعنى، إذن، يكون ما تهدف إليه شيئاً يمكن، منطقياً، إدراكه. لكن خبرتنا حتى الآن تنبئ أن النجاح في الحصول على جواب صحيح يستتبع مزيداً من الأسئلة يطرحها ذلك الجواب. ولا يوجد أي دليل على أن ذلك لن يستمر على هذا المنوال زمناً طويلاً جداً.

وهكذا، بينما يتولد لدينا الأمل في الفهم الجيد للجسيمات الأساسية والقوى ــ وهذا ما يمكن أن يحصل ــ أعتقد أننا سنحتاج إلى أكثر بكثير من خمسة عشر عاماً، مثلاً، لتحقيق ذلك، مع أنه في مثل هذه المدة يستطيع المرء أن يأمل في تحقيق قدر كاف من النجاح لتوليد القناعة بأننا على الطريق الصحيح.

**هناك فرضية، كامنة في كل طرائق توصيف الجسيمات الأساسية وقوى الطبيعة، تقول بأننا نستطيع، بطريقة بسيطة، أن نصور الطبيعة من خلال شذرات وقطع رياضية؛ وأملنا النهائي هو أن تكون الرياضيات بسيطة أو أنيقة على الأقل. هل هذا، في رأيك، مجرد أمل زائف أم تعتقد أن العالم قائم حقاً على مبادئ رياضية بسيطة؟**

يبدو أن الأمر كذلك. أما السبب فهو بالأحرى قضية فلسفية عميقة، وليس لدي جواب في هذا الشأن. يبدو من المعقول أن يوجد تفسير منطقي لكل شيء، والرياضيات تبدو طريقة لوصف الأشياء بشكل منطقي. إن هذا الإيمان، كما يبدو لي، يستند بمعظمه على خبرتنا بأن الرياضيات كانت قد أحرزت نجاحات هائلة في تفسير الطبيعة حتى الآن، وقد استمر ذلك على الدوام إلى سوية أعمق فأعمق. وعلى هذا أعتقد أن هذه الفكرة ستستمر في المستقبل قياساً على الماضي.

**طبعاً، قد يكون الأمر أنك عندما تتعمق إلى سوية معينة، ولنقل سوية الجسيمات مكنونات الذرة مما نتحراه هذه الأيام، تبدو الأشياء مؤقتاً بسيطة جداً، لكنك عندما تتعمق أكثر تجدها معقدة جداً.**

نعم، هذا شعور عبَّر عنه العديد من الناس. فلو كانت نظرية الوتر الفائق سيئة الأداء لأمكن اعتماد وجهة النظر البديلة هذه.

وشيء آخر قد يصادفه المرء هو أن الرياضيات التي تلزمه صعبة لدرجة أن يعجز الفكر البشري عن التعامل معها! وهذا محذور نصادفه من وقت لآخر.

**سمعت من يقول بأن نظرية الوتر الفائق آخر أمل في الحصول على نظرية كل شيء، على الأقل كنظرية تستند إلى رياضيات بسيطة أو طيِّعة. هل تعتقد أن هذا صحيح؟**

لا أعلم إن كان صحيحاً أم لا. أعتقد أن هناك من فكَّر بهذه الطريقة بخصوص نظريات أخرى في الماضي؛ وإذا كانت لسبب ما لا تصلح للعمل، أعتقد أن لا بدّ من ترشيح نظرية أخرى.

**لكي نختم الحديث بنغمة شخصية، متى شعرت بأنك كنت بصدد شيء عظيم؟**

في أثناء تعاوني مع غرين، الذي بدأ عام ١٩٨٠ كما ذكرت، اكتشفنا عدة أشياء، واحداً أو اثنين كل عام، شعرنا أن فيها بعض الأهمية، وبحماس كبير أن علينا أن ننشر ذلك وأن نتحدث عنه في محاضرات نلقيها على زملائنا في أنحاء العالم. وقد شعرت في كل مناسبة، واعتقد أن غرين شعر أيضاً، بأن ذلك كان الاكتشاف الذي سيقنع الناس بأهمية متابعة هذا الموضوع. وكانت مفاجأة لي قريبة من خيبة الأمل أن بقية الفيزيائيين النظريين في العالم ظلوا عدة سنوات غير مهتمين كثيراً بهذا العمل، أو أنهم، إن فعلوا ذلك، فقد أخفوه. كانوا مهذبين معنا فتحملونا، لكن من المؤكد أن غيرهم قد أعرض عن العمل في هذا الموضوع.

عندما وجدنا طريقة حذف الشذوذ في صيف عام ١٩٨٤، كنت قبل ذلك قد تعودت على رد فعل جمهور النظريين، ولذلك لم أتوقع من أحد ولو نوعاً قريباً من الحماس الذي يستحقه هذا العمل فعلاً. كان لدي على الدوام شعور بأن النظرية الوترية الفائقة سوف تصبح الطريقة الهامة في التوحيد، لكنني توقعت أن تكون هذه النقلة تدريجية. والذي حدث، بعد صيف ٨٤ وقبل مضي عام واحد، أن أصبح عدد المشتغلين بهذا الموضوع كبيراً.

**كيف تشعر الآن وقد أصبحت غارقاً في تلك الزوبعة من النشاط الذي تجاوز موضوعك؟ هل تشعر أنك، بمعنى ما، تستطيع أن تتنحى وتراقب تطور الموضوع؟ واضح أنك ما تزال نشيطاً في هذا الميدان.**

أريد أن أظل نشيطاً وأن أحاول الاستمرار في الإسهام بهذا الموضوع. إذ يوجد اليوم حشد هائل من مهرة الناس يقومون بعمل مذهل وليس من السهل منافسة بعضهم. خصوصاً وأن بعض الشباب منهم يعرفون قدراً هائلاً من الرياضيات الضرورية لذلك ويقومون بعمل جيد جداً. إن هذا التطور يسعدني جداً بالطبع؛ إذ لما كان اثنان منا فقط يقومان بالعمل (يجب مع ذلك أن أذكر أننا عملنا أيضاً مع لارس برنك L.Brink، أي كنا ثلاثة أحياناً) كانت إحدى السلبيات أن تطور الموضوع ظل بطيئاً بعض الشيء. كان يوجد كثير من المسائل الهامة لكن لم يكن لدينا ما يكفي من الوقت، ولا من القدرة والقابلية على ما أظن، لمتابعتها كلها، وكنا متلهفين لمعرفة ما سوف تسفر عنه. واليوم أصبح التطور سريعاً يستحيل معه مسايرة ما يُنشر ــ يصلني كوم من النشرات الجديدة كل يوم ــ وقد يصرف المرء كل وقته في قراءتها فقط، دون أن يبقى له ما يكفي لعمل أي شيء آخر!

# 3

## إدوارد ويتن

إدوارد ويتن E.Witten أستاذ في معهد برنستون للدراسات المتقدمة. أسهم إسهامات هامة عديدة في الفيزياء النظرية الجسيمية ونظرية الحقل الكمومية وخصوصاً في الكروموديناميك الكمومي ونظريات الأبعاد الإضافية، قبل أن يلتفت إلى الأوتار الفائقة. إنه واحد من أصفى النظريين ذهناً ومن أبرز المدافعين عن الموضوع.

### ماهي المسائل الجوهرية التي تدّعي نظرية الوتر الفائق معالجتها؟

يوجد، في فيزياء القرن العشرين، ركيزتان أساسيتان حقاً، إحداهما النسبية العامة، وهي نظرية أينشتاين في الثقالة، والأخرى ميكانيك الكم، وهي نظرية تهتم بكل ما يحدث في المجال المجهري. وهذه الأخيرة نظرية في سلوك الذرات والجزيئات molecules وما دونها صغراً مما يسمى الجسيمات العنصرية. والمشكلة الأساسية في الفيزياء الحديثة هي أن هاتين الركيزتين متعارضتان. فإذا حاولت أن تضم الثقالة وميكانيك الكم معاً، ستجد أنك تحصل على نتائج لا معقولة على صعيد الرياضيات. ستجد دساتير يُفترض أن تكون دساتير كمومية ثقالية. فتحصل على كل أنواع اللانهائيات. ومن المزعج جداً للفيزيائي أن يصادف لانهائيات في سياق حساباته.

إن معظم الناس، ممن لم يتدربوا على التعامل مع الفيزياء، يظنون على الأرجح أن ما يفعله الفيزيائيون ليس أكثر من حسابات معقدة لدرجة لا تُصدق. لكن ذلك ليس جوهر الموضوع في الواقع. فجوهر الموضوع هو أن الفيزياء قضية مفاهيم يحاولون إدراكها، ومبادئ يسير العالم على هداها. وفي النظريات الجيدة، كالنسبية العامة، يوجد مفهوم فكري مصوغ بشكل محدد جيداً، وعندما تتعلمه تقول في نفسك «نعم، إن هذه المفاهيم مثالية»، وإن النظرية المبنية عليها هي أحسن وعاء لها.

لكن ميكانيك الكم يختلف عن ذلك قليلاً . إنه ينمو عبر عمليات معقدة ، وفوضوية بعض الشيء ، تستمد قوتها من التجربة المخبرية . ولئن كان نظرية مدهشة وغنية ، إلا أنه لا يملك من الأسس الفكرية مثل ما تملكه نظرية النسبية العامة .

والمشكلة في الفيزياء هي أن كل شيء فيها يستند إلى هاتين النظريتين المختلفتين ، وعندما نضعهما معاً نحصل على أشياء غير ذات معنى . وتاريخ الفيزياء هو تاريخ اكتشافات مفاهيم ذات دقة متزايدة تعتمد عليها كل القوانين الطبيعية . ولدى تزايد نعومة هذه المفاهيم يصبح على كل نظرية يتناقص محتواها من المبادئ أن تفسر دفعة واحدة أشياء أكثر فأكثر عدداً ، وبذلك تغدو بالتدريج أكثر فأكثر تعقيداً لدى كتابة شيء نريده أن يكون متماسكاً داخلياً . ففي عصر نيوتن كانت المسألة تقضي بكتابة شيء معروف أنه صحيح — لم يكن عليه قط أن يكتب شيئاً غير ذي معنى ؛ لكننا ، في أوائل القرن العشرين ، أصبحنا نملك ذخيرة غنية بالمفاهيم مع نظريتي النسبية وميكانيك الكم وسواهما . ومن الصعب في هذا الإطار أن نفعل أشياء على الأقل متماسكة داخلياً ، ولو كانت أقل صحة بكثير .

إن هذا في الواقع من حسن الحظ ، بمعنى انه إحدى الوسائل الأساسية التي نملكها في محاولة دفع الفيزياء إلى الأمام . ولقد تقدمت الفيزياء حتى بلغت مرحلة أصبحت التجارب فيها أكثر صعوبة ، ولم تعد تتقدم بالسرعة التي كنا تعودناها قبل خمسين أو ستين سنة خلت . لكن واقع أننا أصبحنا نملك بنية منطقية غنية تحد كثيراً من حريتنا في مجال ما نعتبره متماسكاً ، هو أحد الأسباب الرئيسية في أننا ما نزال قادرين على التقدم .

وعلى هذا فإن أهم ما يجب أن نتذكره دوماً بخصوص النظرية الوترية هو أنها تهدف إلى تخطي ما كان المسألة المركزية في الفيزياء لعدة عقود من السنين : التعارض بين نظرية الثقالة وميكانيك الكم .

## كيف يمكن حل هذا التعارض ؟

إن أكثر ما يزعج الفيزيائيين في هذا القرن هو أنك إذا أخذت جسيماً كالإلكترون واعتبرته كائناً نقطياً ، ثم حسبت بعناية حقليه ، الكهربائي والثقالي ، ستجد أن في حقله الكهربائي طاقة لا نهائية ، وطاقة لا نهائية أيضاً في حقله الثقالي . وهذه المسألة امتدت اليوم إلى عدة مجالات مختلفة . وقد كانت مصدر إزعاج للفيزيائيين التقليديين . وكانت أيضاً ، في مجال الحقل الكهربائي ، مصدر قلق للفيزيائيين الكموميين ، بعد إنشاء ميكانيك الكم .

كانت الخطوة الحاسمة في حالة الكهرطيسية هي أن مبدأ الارتياب يجعل الالكترون ضبابياً نوعاً ما ، مما يساعدنا على صنع معنى لحقله الكهربائي .

وعندما ذهبنا نبحث عن معنى للحقل الثقالي للإلكترون وجدنا أن مسعانا يبوء بالفشل إذا اعتبرنا أن الالكترون جسيم نقطي ، كما يظن معظم الفيزيائيين في هذا القرن . لكن الإلكترون لم **يعد في النظرية الوترية جسيماً نقطياً ، بل وتر صغير مهتز . والبعد الاضافي للوتر المهتز يجعلنا** قادرين على صنع معنى لحقله الثقالي . وأنا أتخذ الالكترون كمثال توضيحي فقط ؛ لأن مسألة طاقته الكهربائية اللانهائية مسألة نموذجية في هذا الشأن ؛ فنحن نواجه المسألة نفسها بخصوص كل الجسيمات العنصرية ؛ والنظرية الوترية تتناول حصراً هذه المسألة لدى كل الجسيمات وفي كل تفاعلاتها .

## وعلى هذا نكفّ عن الاعتقاد بأن العالم مصنوع من جسيمات ، لكنه صُنع من أوتار صغيرة متموجة ؟

هذا صحيح . عندما نفكر بالجسيمات علينا أن نتذكر أن كل شيء في هذا العالم اعتُبر منذ نشأة ميكانيك الكم ضبابياً بعض الشيء ، أي إنه ضبابي قليلاً إذا قيس بالصورة الشائعة لماهية الجسيم . وفي النظرية الوترية يحل وتر كمومي صغير محل الجسيم الكمومي الضبابي . إنه وتر مهتز وهو ، فوق ذلك كله ، ضبابي بعض الشيء أيضاً بموجب ميكانيك الكم .

## هل يوجد أنواع مختلفة من الأوتار ؟

يوجد بضع نظريات وترية ، لكن معظمها يقوم أساسياً على نوع وتري واحد . كذلك تعلم أن الوتر الواحد يستطيع أن يقوم بأنواع من الحركة عديدة . فكّر بآلة الكمان ؛ إن الوتر فيها ، عندما تعزف عليه ، قادر على الاهتزاز بتواترات عديدة مختلفة ، تسمى مدروجات harmomics . واختلاف مدروجات وتر الكمان أساسي في غنى الصوت ؛ وهذا هو السبب في اختلاف أصوات الآلات الموسيقية المختلفة ، حتى لو كانت كلها تعزف نغمة واحدة . يمكنك أن تعزف نغمة معينة واحدة على البيانو أو على الكمان ، لكنك تسمع صوتين مختلفين لأن الوتر نفسه يمكن أن يهتز بأساليب مختلفة ذات مدروجات مختلفة . والآلات المختلفة تُصدر مدروجات مختلفة بنسب متفاوتة .

في حال وتر الكمان تعطي المدروجات المختلفة أصواتاً مختلفة . وفي حال الوتر الفائق تعطي المدروجات المختلفة الجسيمات العنصرية المختلفة . فالإلكترون والغرافيتون والنترينو وكل الجسيمات الأخرى هي مدروجات مختلفة لوتر أساسي واحد ، تماماً كالأصوات المختلفة الصادرة عن وتر واحد ذي مدروجات مختلفة .

**هل يذهب تعميم هذا التشابه لدرجة أن نقول إن الجسيمات الأساسية المختلفة في الطبيعة تمثل، بمعنى ما، أنغاماً موسيقية مختلفة؟**

إنه تشبيه جيد إلى حدٍ ما.

**كم يبلغ قياس هذه الأوتار؟**

لنقل إن الوتر المتعلق بالالكترون قد لا يتجاوز $10^{-33}$ سنتيمتراً، مما يجعله أصغر من أي شيء صغير يمكن أن تتخيله. فقطر الذرة من رتبة $10^{-13}$ سم، والنواة أصغر من ذلك بنحو مئة ألف مرة؛ في حين أن الوتر الفائق الذي يمثل جسيماً عنصرياً أصغر حتى من هذه القيمة لدرجة لا يمكن تصورها.

**لكنه مع ذلك ليس كائناً نقطياً، ذلك هو بيت القصيد.**

كلا، ليس هو شيئاً نقطياً؛ بل هو أساسياً كائن ذو امتداد، وهذا شيء جوهري لتماسك المخطط كله.

وربما استطعت بهذه المناسبة أن أقول: رغم أن الوتر الفائق الذي يمثل جسيماً عنصرياً صغير لدرجة لا تُصدق، فليس من سبب مبدئي يحول دون أن تستطيع، بواسطة ملقطين قويين، أن تمسك بطرفيه وتمطه جاعلاً إياه يطول أكثر فأكثر. أما قضية انقطاعه فتتعلق بالنظرية الوترية المختارة؛ لكن معظم النظريات تقول بأنه لا ينقطع، وأنك تستطيع فعلاً أن تمطَّ سلكاً عبر الغرفة بحيث يصبح وتراً فائقاً محسوساً. ويمكن تشبيه ذلك بنوع وتري آخر كثيراً ما ناقشه الفيزيائيون والفلكيون في الأيام الأخيرة وسموه الوتر الكوني، وربما أمكن لوتر من هذا النوع أن يمتط عبر السماء، وأن يكتشفه الفلكيون ذات يوم.

**هل تريد أن توحي بإمكان وجود أوتار كونية في هذا العالم متبقية من أوتار فائقة خلّفها الانفجار الأعظم؟**

ذلك ممكن، لكنني لا أريد الإصرار عليه بشكل خاص. لكن بعض النظريات الوترية تقول مبدئياً بإمكان وجود أوتار ممتطة عبر السماء، قد يمكن اكتشافها بالمرقاب (التلسكوب).

**هلّا ذكرت لنا شيئاً عن توبولوجية الأوتار الفائقة؟**

إن معظم النظريات الوترية تقول بأن الأوتار ذات شكل حلقي. وكل النظريات الوترية تنطوي على أوتار مغلقة، أوتار تشكل حلقات، وإن كان معظمها لا يحوي إلا أوتاراً مغلقة؛ لكن هناك واحدة، تدعى النظرية الوترية من النوع 1، تقول بوجود أوتار مفتوحة وأوتار مغلقة.

### ما الذي أغراك أول الأمر بالنظرية الوترية؟

بشكل رئيسي، إمكان التوفيق بين الثقالة وميكانيك الكم. كان ذلك الموضوعَ المركزي في الفيزياء، وقبل أن أعمل في هذا المجال بزمن طويل. كان ميكانيك الكم والحقل الكمومي نظرية نشأت في أواخر العشرينيات. وكان واضحاً منذ البداية وجود مشكلة بخصوص التماسك بين الثقالة وميكانيك الكم. كانت نظرية الحقل الكمومية في ذلك الوقت تشكو من مشاكل عديدة أخرى، مما أبعد الفيزيائيين عن تركيز الاهتمام على تلك المشكلة؛ لكن المسائل الأخرى حُلَّت بمرور الزمن وفسحت المجال لبروز مسألة التعارض بين الثقالة وميكانيك الكم كمسألة مركزية في الفيزياء النظرية، وربما أكثر الجميع صعوبة. وقد مرت هذه المسألة بأوقات انصرف فيها الناس عنها بسبب صعوبتها الكبيرة وعدم ظهور أية فكرة مغرية بخصوصها.

إن النظرية الوترية جذابة جداً لأن الثقالة مفروضة علينا فيها. فكل النظريات الوترية المنطقية المعروفة تضم الثقالة؛ وفي حين أن الثقالة مستحيلة في نظرية الحقل الكمومية كما هو معلوم، نجد أنها إجبارية في النظرية الوترية.

ذلك جانب واحد من الجوانب المغرية في النظرية الوترية. وهناك جانب آخر هو غناها الكبير بالبنى الرياضية التي تتولد منها. وأعتقد أن في هذا الجانب مغزى مهماً جداً، لأن الفيزياء استلزمت في تقدمها على مر السنين مزيداً من البنى الرياضية المتوالية. وأنا اعتقد شخصياً أن ما جلبه التقدم، في مجال التوفيق بين الثقالة وميكانيك الكم، من غنى في البنى النظرية إلى برنامج الفيزيائيين النظريين، لم يكن من قبيل المصادفة بتاتاً.

### ما هي المجالات الرياضية التي فتحتها هذه النظرية؟

هناك نظرية السطوح الريمانية Riemann surfaces، ونظرية تلك الأنواع من التناظر المعروفة باسم جبر «لي» Lie algebra، وتشكيلات أخرى. فهناك مجالات رياضية عديدة اكتسبت أهمية كبيرة في النظرية الوترية بعد أن كانت في الماضي عديمة المعنى في الفيزياء. وهذا استمرار لعملية كانت تحصل دوماً كلما طرأ على الفيزياء الأساسية تقدم مهم.

### إن المجالات التي تذكرها هي فروع من الهندسة، أو تعميمات لها. هل هذا صحيح؟

إنها، بالدرجة الأولى، مجالات من الهندسة، وربما من الجبر. والنظرية الوترية في دقائقها فرع جديد، أو يجب أن تكون فرعاً جديداً، من الهندسة. وقد كان أعظم ما أنجزه أينشتاين في النسبية العامة هو أنه أرسى نظرية الثقالة على أسس هندسية، أي على هندسة ريمانية. وأذا أريد للنظرية

الوترية أن تكون الوريث الكفؤ للنسبية العامة يجب أن تكون ، هي الأخرى ، ذات أساس هندسي لا نرى منه اليوم إلا بصيصاً . لكننا ، في معظمنا ، على قناعة راسخة بأن هذا الأساس موجود .

**هل تعتقد أن العديد من الخواص الفيزيائية دون الذرية نابع ، في الواقع ، من أصل هندسي ؟**

إن النسبية العامة ، التي تعتمد فيها إحدى الظواهر الفيزيائية ( الثقالة ) على مبادئ هندسية ، هي حقاً أكمل النظريات الفيزيائية وأحسنها قبولاً على هذا الصعيد . وقد كان من طموح الفيزيائيين ، منذ أينشتاين ، أن يصلوا إلى تلك الدرجة من الكمال في فروع فيزيائية أخرى تتخذ في النهاية شكل صورة موحَّدة للفيزياء .

إنني أعتقد شخصياً ، وبقناعة كبيرة ، أن الأرضية التي تقوم عليها النظرية الوترية ستتجلى حتماً على شكل تطور مناسب للأفكار الهندسية التي بنى عليها أينشتاين نظرية النسبية العامة . وفي هذا السياق أرى أن السعي إلى استجلاء هذا التعميم في علم الهندسة هو المهمة المركزية في الفيزياء ، وهو بالتأكيد المسألة المركزية في النظرية الوترية .

**هل تعتقد أن بالإمكان أن نفهم بعض الخصائص ، كالشحنة الكهربائية ، من منطلق هندسي ؟**

أعتقد أن النظرية الوترية بمجملها ستسفر عن كونها نظرية هندسية وأنها ، بمقدار ما تنجح في تفسير مختلف القوى ، سوف تعطي ما يمكن أن نسميه أساساً هندسياً لخصائص من قبيل الشحنة الكهربائية .

**لقد عملتَ حتى الآن في النظرية الوترية مدة لا بأس بها ، ولابدّ أن تكون قد كوَّنت فكرة عما ستؤول إليه هذه النظرية . فما مدى أمَلك في أن تصبح نظريتكم هذه النظرية الأساسية في كل شيء ، كما يقال ؟**

لا أُحب أن أتكهن بخصوص نظريات كل شيء ؛ لكن الذي أريد قوله هو أنني على يقين من أن النظرية الوترية تمضي بنا إلى سوية فيزيائية أساسية جديدة لا تقل أهمية عن سواها من مراحل التقدم التي أنجزتها الفيزياء في تاريخها . وفي الوقت نفسه أعتقد أنها عملية تحتاج إلى نفس طويل . تذكر أنك إذا اخترت لميلاد النظرية الوترية نموذج فينيزيانو ستجد أن عمرها اليوم لا يزيد على ثمانية عشر عاماً ؛ وإذا ألقيت نظرة إلى الوراء سترى أننا قطعنا شوطاً طويلاً في الأعوام العشرة أو الخمسة عشر الماضية ، وأننا كان علينا أن نعرف الكثير من الأشياء التي كنا نجهلها ، وربما كنا ما نزال نجهل الكثير حتى اليوم . إننا نعيش على الأرجح حقبة قد تكون المراحل الأولى لعملية تشبه تلك التي قادت إلى الالكتروديناميك الكمومي . فالنظرية الكمومية بدأت عام ١٩٠٠ مع أعمال بلانك على إشعاع الجسم الأسود ، وهذا العمل الأصلي كان ينطوي فعلاً على دستور فيما يمكن أن

نسميه النظرية الكمومية في الكهرباء. هذا رغم أن نظرية الإلكتروديناميك الكمومي التي هدف إليها بلانك لم تظهر إلا بعد خمسين عاماً.

وعلى هذا فإن الأعوام الثمانية عشر من رحلة النظرية الوترية حتى اليوم تشبه على الأرجح المراحل المبكرة في العملية الطويلة التي انتهت إلى الإلكتروديناميك الكمومي.

**هل ستكون مضامين هذه النظرية على درجة من العمق تضاهي ما هو قائم في الإلكتروديناميك الكمومي؟**

أتوقع أن يؤدي استجلاء كل مضامين النظرية الوترية إلى ثورة في مفاهيم كل القوانين الأساسية في الفيزياء تضاهي كل ما حصل في الماضي.

**بما أن النظرية ما تزال في مراحلها التشكيلية، هل لك أن تذكر بعضاً من نجاحاتها المؤكدة حتى الآن؟ هل هي مجرد رياضيات جميلة تبدو مثيرة للفيزيائيين، أم أن فيها شيئاً محسوساً؟**

إن التوفيق بين الثقالة وميكانيك الكم إنجاز عظيم. لقد كانت هذه المشكلة مسألة المسائل في الفيزياء قبل أن أعمل في هذا المجال بوقت طويل.

**هل تريد أن تقول إن هذا الاتفاق واضح اليوم؟**

نعم، هذا ما أريد قوله. أريد أن أقول إن النظرية الوترية، في مرحلتها الحالية ومنذ بضع سنوات، ترسم في الواقع إطاراً متماسكاً منطقياً يضم الثقالة وميكانيك الكم معاً. لكننا، في الوقت نفسه، لم نجد بعد الإطار المبدئي الفكري الذي يقابل مبدأ التكافؤ في نظرية أينشتاين الثقالية والذي يجب أن نفهم الأمور من خلاله.

ومن الجدير بالذكر أن تاريخ العلم يؤكد أن التوفيق بين النظريات الفيزيائية المتعارضة وسيلة جيدة جداً على طريق إحراز تقدم أساسي. فإذا نظرنا إلى بعض ما أُحرز من تقدم في القرن العشرين نرى أن نظرية أينشتاين في النسبية الخاصة نشأت من الرغبة في التوفيق بين نظريتين أساسيتين: نظرية مكسويل الكهرطيسية وميكانيك نيوتن. وعلى غرار ذلك نشأت النسبية العامة من جهود أينشتاين في التوفيق بين نظريته النسبوية الخاصة ونظرية نيوتن الثقالية. ونذكر أخيراً أن نظرية الحقل الكمومية نشأت من جهود التوفيق بين الميكانيك اللانسبوي وبين النسبية الخاصة. كل ذلك يثبت أن معظم التقدم الذي تم إحرازه في القرن العشرين قد حصل بفضل التوفيق بين نظريات سابقة متعارضة فيما بينها. وهكذا يعلمنا التاريخ أن التوفيق بين النظريات المتعارضة وسيلة جيدة لإحراز تقدم أساسي حقيقي.

**ماهي في رأيك المسائل الأساسية البارزة في النظرية حتى اليوم؟**

إن هدف الفيزيائي لا يقتصر على تعلُّم كيفية إجراء الحسابات، بل يجب عليه أن يفهم المبادئ التي تحكم مجريات هذا العالم. والفيزياء، كما ذكرتُ سابقاً، تهدف جوهرياً إلى اكتشاف مفاهيم جديدة. والشيء البارز الذي لا نرضى به في النظرية الوترية اليوم هو أننا، برغم ما فيها من مزايا عديدة وما أُكتُشف بها من أمور مدهشة، لا نفهم من إطارها الفكري الخاص إلا القليل جداً، بخلاف ما نفهمه من الإطار الهندسي للنسبية العامة. فالمسألة المركزية التي نريد إحراز أكبر تقدم فيها هي إيضاح الإطار المنطقي الذي يجب أن نفهم بوساطته النظرية الوترية. وقد تظل هذه المسألة مستعصية عدة سنين.

إن النسبية العامة تنبثق بطريقة لا محيد عنها من المبادئ التي بُنيت عليها. فبمجرد أن تضطلع ببناء نظرية ثقالية على أساس هندسي، وأن تكون قد فهمت النسبية الخاصة، كل ذلك من خلال بضعة مبادئ عامة تستطيع تمثيلها بمخططات تجريبية فيزيائية (كتجربة مصعد أينشتاين الفكرية وبضعة تجارب أخرى)، وبعد أن تدرك المفاهيم الأساسية، يأتي دور الرياضيات. والرياضيات وعاء مثالي لتلك المفاهيم. وقلما تجد وعاءً أحسن منه.

إن ما نتوقع وجوده في النظرية الوترية، وهو ما نطمح إلى إكتشافه أكثر من أي شيء آخر، هو إطار مفهومي منطقي يضاهي ما في النسبية العامة، فيجعل النظرية الوترية مذهباً طبيعياً لا يقل في هذ الشأن عن النسبية العامة. ونحن نسعى إلى اكتشاف ذلك لأن اكتشاف الأفكار التي تسود في سلوك هذا العالم هو هدف الفيزيائي في كل حال. والهدف الآخر من البحث عن الإطار المفهومي الصحيح هو أن الفهم الجيد للنظرية الوترية أمر ضروري حتماً لإجراء الحسابات التي نريد إجراءها. ونحن نريد استخدام النظرية الوترية في حساب كتل الجسيمات العنصرية وآجالها وتفاعلاتها وثوابت الاقتران واحتمالات كل أنواع العمليات. وتلك هي الطريقة الوحيدة، أي مقارنة الحسابات بالتجارب، التي نستطيع بها التحقق من صحة النظرية.

على أن من المحتمل جداً أن يكون إجراء هذه الحسابات صعباً إذا كنا لا نفهم النظرية إلا بشكل تقريبي وكانت أسسها غير معروفة. وأعتقد جازماً أن الثمن الفكري، وربما الثمن العلمي، للنجاح في ذلك يتطلب فهم الإطار المنطقي. تلك هي المسألة التي أتمنى إحراز تقدم فيها إذا قُدِّر لأمنياتي أن تتحقق.

**بما أن من الصعب جداً إجراء حسابات عملية لهذه الكتل وثوابت الاقتران ونتائج هذه النظرية في الطاقات المنخفضة، فهل سيوجد مجال آخر يمكن فيه إجراء اختبارات تجريبية؟ هل يُحتمل**

**أن تتنبأ النظرية بوجود أنواع جسيمية أخرى أو ظواهر أخرى قد تتكشف في مسرِّعات الجسيمات ؟**

إن لب هذه المسألة هو أنك إذا استطعت حساب كل شيء في النظرية الوترية تستطيع عندئذ أن تعلم بالتجربة ، وفي وقت قصير ، إن كان حسابك صحيحاً . وعلى غرار ذلك ، إذا استطعت إجراء تجارب في مجال ما يسمى طاقة بلانك ، حيث تتجلى المسائل الأساسية للثقالة وميكانيك الكم ، ستكون عندئذ قادراً على أن تعلم بسرعة إذا كانت النظرية الوترية صحيحة أم لا .

**لكن الأمل في ذلك معدوم، أليس كذلك ؟**

من سوء الحظ أن الأمل معدوم في إجراء تجارب في تلك الطاقات العالية ، كما أن الأمل في حساب كل شيء معدوم أيضاً حالياً . وعلى هذا نتساءل إذا كنا نستطيع بشيء من حسن الحظ أن نعثر على مجال صغير نستطيع أن نصنع فيه نبوءات غير معروفة دون أن نكون قادرين على فهم النظرية الوترية فهماً جيداً . إن هذا ممكن ، لكنني غير متفائل جداً بأن هذا سيحدث في غضون السنوات القليلة القادمة .

**ألا يمكن التنبؤ بجسيمات جديدة أو شيء من هذا القبيل ؟**

**هناك من النظريات الوترية ، والنماذج التي تعمل بموجبها هذه النظريات ، ما يتنبأ بشحنة كسرية وغير محدودة بحيِّز وذات كتل من رتبة طاقة بلانك ، يمكن أن يؤمل باكتشافها في الأشعة الكونية .**

**أليست هي جسيمات أثقل بكثير جداً من كل الجسيمات الأساسية المعروفة ؟**

أقصد جسيماً عنصرياً مفرداً ذا كتلة تضاهي كتلة جرثومة .

**لكن له بصمة خارقة تتمثل في أن شحنته أصغر من شحنة الجسيمات الأخرى ؟**

صحيح . إنها جزء من شحنة الإلكترون .

**وأن هذه الجسيمات من مخلفات الانفجار الأعظم *big bang* ؟**

**إن أملنا الوحيد في اكتشافها يكمن في أن تكون موجودة ضمن بقايا الانفجار الأعظم . وتستطيع أن تُجري تقديراً تقريبياً — كم واحد منها يمكن أن يكون موجوداً حتى اليوم في الأشعة الكونية ؟ فنحن نعلم مقدار المادة المفتقدة في جوار المنظومة الشمسية ، وهي تسمى أحياناً المادة الخفية dark matter . وفي أكثر التقديرات تفاؤلاً ، على فرض أن المادة المفتقدة مصنوعة كلها من تلك الجسيمات البلانكية ذات الشحنة الكسرية ، يبدو أن بالإمكان اكتشافها بوساطة كواشف وحيدات القطب monopoles المغنطيسي . وهذا نموذج لما يمكن أن أُسميه حظاً سعيداً ، لأن ما من**

**أحد يستطيع أن يؤكد أن كل المادة الخفية مصنوعة فعلاً من تلك الجسيمات . وإنني لعلى يقين من أن هناك فرصاً أخرى لحظ سعيد لم يفكر بها أحد حتى الآن ، لكنني لا أريد أن أغامر بإصدار تكهنات حول الزمن الذي تقتضيه ضربة حظ سعيد من هذا القبيل .**

**لقد استعملتَ عبارة « نظريات وترية » بصيغة الجمع ، وهذا يبدو متعارضاً مع ادّعاء أن هذه النظريات محدودة . وكثيراً ما يقال إن أحد الجوانب الجميلة في النظريات الوترية هو أنها لا تتيح كثيراً من الحرية . فما هو عدد النظريات الوترية إذن ؟**

إن وضع الأمور في نصابها يستلزم أن لا ننسى أن نظرية الحقل الكمومية المعتمدَة تحوي عدداً لا نهائياً من النظريات الممكنة . وقد فحص الفيزيائيون النظريون آلافاً منها فحصاً جدياً . وبهذا المقياس ترى أن النظرية الوترية بصحة جيدة الآن ، إذ لا يوجد منها سوى زهاء أربع أو خمس ، وربما ست نظريات وترية متماسكة حسب طريقتك في العد .

**ما هي أصناف المعايير التي يمكن استخدامها لتصغير هذا العدد ؟**

علينا في الوقت الحاضر أن نرضى بما أنجزناه من إنزال هذا العدد إلى خمس أو ست انطلاقاً من ملايين النظريات أو من آلافها أو من عدد لا نهائي منها . وهذا بحد ذاته شيء يبعث على سرور كبير وإن كنا لم نذهب إلى أبعد من هذا الحد .

**إن إحدى الميزات أو ، في أري بعضهم ، إحدى الغرائب التي تتسم بها النظريات الوترية الفائقة هي أن الأوتار تعيش في عالم ذي أبعاد يفوق عددُها عددَ أبعاد الفضاء المألوف الثلاث مضافاً إليها البعد الزمني . فهل من الخير لنا أن نقبل بوجود تلك الأبعاد الإضافية ؟**

إن كل شيء في العالم الطبيعي ضبابي قليلاً ما ، بسبب مبدأ هايزنبرغ الارتيابي والأفكار الأساسية في ميكانيك الكم . فماذا تزن تلك الأبعاد الإضافية القليلة إذا كانت صغيرة لدرجة أن تحجب ضبابيةُ الحياة العادية كلَّ شيء في حيز يفوق باتساعه حيز الأبعاد الإضافية ؟ لا بدّ أنك ستبذل جهوداً مضنية كي « تلحظ » هذه الأبعاد . فالفكرة هي أنك لا تلحظ الأبعاد الإضافية إذا كانت صغيرة لتلك الدرجة .

أستطيع أن أقول إن فكرة الأبعاد الإضافية قد تكون ذات وقع غريب قليلاً في سمع كل من لم يدرس الفيزياء . وكل من اتخذ الفيزياء مهنة له يعلم أن هذا العلم ينطوي على أفكار أكثر غرابة من الأبعاد الإضافية . فالنسبية العامة غريبة ، وكذلك ميكانيك الكم والمادة المضادة ، كل هذه الأشياء غريبة ، لكنها صحيحة . فبالمقارنة بهذه الأمور الغريبة التي تأكدت صحتها في ماضي تاريخ الفيزياء ، ترى أن الأبعاد الإضافية ليست انحرافاً خطيراً عن هذا الطريق .

**هل لك أن تشرح لنا كيف تلتف هذه الأبعاد الإضافية على نفسها حتى تبلغ تلك الدرجة من الصغر ؟**

يمكننا أن نحاول فهم هذه الصورة ، ويمكن أن نرى ذلك إذا اعتمدنا فرضيات بسيطة بخصوص كيفية التفاف الأبعاد الإضافية على نفسها ، فنحصل على نماذج تقريبية معقولة ومشوقة في فيزياء الجسيمات العنصرية . ولا أعتقد أن هناك أملاً في أن نفهم تماماً كيف تلتف الأبعاد الإضافية على نفسها دون أن نفهم بشكل أحسن كنه النظرية الوترية . فالعائق الأكبر في هذا السبيل هو أن إدراكنا لهذا الموضوع ما يزال بدائياً وتقريبياً .

لقد أنشأ أينشتاين نظرية النسبية العامة حين كانت الأفكار الأساسية التي يحتاجها في الهندسة جاهزة مستنبطة منذ القرن التاسع عشر . وقد قيل إن النظرية الوترية جزء من فيزياء القرن الواحد والعشرين ظهر مصادفة في القرن العشرين . وهذه ملاحظة أبداها أحد الفيزيائيين القادة منذ نحو خمسة عشر عاماً . كان يعني أن الكائنات البشرية على الكوكب الأرضي لم تملك قط الوعاء الفكري الذي يمكن أن يقودها إلى اختراع النظرية الوترية من خلاله . لقد تم اختراع هذه النظرية بما يشبه المصادفة في سلسلة من الأحداث بدأت من النموذج الذي صاغته فينيزيانو عام ١٩٦٨ . لم يبحث عنها أحد عمداً ، بل حدث اختراعها بمصادفة سعيدة ..والحق أن ليس من حق فيزيائيي القرن العشرين أن يخوضوا في دراسة هذه النظرية . بل الحق أن اختراعها كان يجب أن لا يحدث قبل أن تنشأ المعلومات المطلوبة سلفاً لفهمها وتتطور حتى تبلغ مرحلة تتيح لنا إدراك كنهها الحقيقي .

**لابدّ لها من رياضيات القرن الحادي والعشرين ؟**

على الأرجح . فالذي كان يجب أن يحدث حقاً هو أن تنشأ بنى رياضية صحيحة ، في القرن القادم أو الذي يليه ، قبل أن يخترع الفيزيائيون النظرية الوترية كنظرية فيزيائية يمكن استنباطها من خلال تلك البنى . ولو كان ذلك قد حصل بهذا الشكل لربما عرف الفيزيائيون الأولون ، ممن عملوا في النظرية الوترية ، معنى ما يفعلونه ، على غرار ما كان أينشتاين يعرفه إبان اختراعه لنظرية النسبية العامة . كان ذلك حرياً بأن يكون الطريق الطبيعي لحدوث الأشياء ، لكنه كان سيحرم فيزيائيي القرن العشرين من فرصة التعامل مع تلك النظرية الساحرة . لكن الواقع هو أننا أصبنا حظاً سعيداً من أن النظرية الوترية قد اختُرعت دون أن تبذل الكائنات البشرية الأرضية من الجهد ما يستحق الذكر حقاً . لكننا ، وقد أسعدنا الحظ بها ، نحاول أن نبذل خير ما نستطيع لها . لكننا ندفع ثمن أننا لم نصل إليها في طرق البحث العادية .

**نقطة واحدة أخيرة، بخصوص تلك الأبعاد الإضافية. كم عدد الطرائق المتاحة للأبعاد الإضافية في التفافها على نفسها؟**

لقد تخيَّل الفيزيائيون العاملون في هذه المسألة عدة طرائق لالتفاف الأبعاد الإضافية على نفسها، وقد يوجد طرائق أخرى لم يفكر بها أحد بعد. لكن الواقع، على الأرجح، هو أن العملية كلها لابد أن تكون أدق وأعقد مما تصورنا حتى الآن.

**هل كل تلك النظريات مُرْضية، أم أننا سنتمكن عما قريب من انتخاب طريقة معينة في التفاف الأبعاد الإضافية؟**

أظن أننا بحاجة إلى فهم أحسن لما نتعامل معه من أنواع النظريات قبل أن ننجح في العثور على طريقة لفعل ذلك.

**يبدو في الوقت الحاضر أن هذه العقبة هي أصعب العقبات على طريق تقدم هذه النظرية ــ أي جهلنا كيفية التفاف الأبعاد الإضافية على نفسها.**

سنكون حتماً أسعد إذا فهمنا ذلك وفهمنا، من ثَم، حالة الخلاء في تلك النظرية.

**هل هناك حاجة لحل هذه المسألة قبل أن تنجحوا في حساب أي من التفاصيل الدقيقة لكتل الجسيمات أو شحناتها وما إلى ذلك؟**

هذا صحيح. وعندئذ نحصل على المكافأة التي هي حساب كتل الجسيمات وآجالها الحياتية وتفاعلاتها وما إلى ذلك. لكنني مع الأسف لا أظن أن أحداً يستطيع أن يُتم هذه المهمة عما قريب. اعتقد أن أمامنا على الأرجح أن نكتسب كثيراً من المعلومات عن هذه النظرية قبل أن نستطيع فعل ذلك. ذلك هو رأيي الشخصي. وهناك أفكار عديدة بخصوص التفاف الأبعاد الاضافية، وأناس كثيرون يجربون حظهم في هذا الشأن ويحومون حول الأفكار المعروفة، ويقترحون أفكاراً جديدة. لقد سمعت أمس فقط بفكرة جديدة حول هذا الموضوع.

**إذن ما هو الاتجاه الرئيسي في التحريات الراهنة إذا كانت المسألة المركزية ستظل دون حل مدة من الزمن؟**

هناك نفر من الفيزيائيين يعملون بطرائق مختلفة على ما أرى أنه مسألة فكرية جوهرية بخصوص كنه النظرية الوترية، أي معرفة المبدأ التناظري الذي يقابل المبادئ التناظرية في النظريات الأخرى.

**قد يرى بعض الناس أن ليس من الخير أن يُكرّس جيش صغير من الفيزيائيين اهتمامهم لنظرية لايؤمل منها كثيراً أن تتصل بالتجربة قبل الجيل القادم. هل تعتقد أن هذا الموضوع يستحق أن نوليه هذا الاهتمام الشديد؟**

أستطيع أن أتكلم عن نفسي فقط. أعتقد أنها ضربة حظ رائعة أن يعمل الفيزيائي في عصر نشأت فيه النظرية الوترية. وأعتقد شخصياً أن فيزيائيي القرون القادمة سيقولون، عندما ينظرون نحو الماضي، بأن زماننا هذا كان واحداً من أعظم الأوقات في مهنة الفيزياء.

**إذا نظرنا خمسين سنة إلى الوراء في تاريخ الفيزياء، هل تعتقد أن تغيراً أساسياً طرأ على طريقة تناول هذا العلم؟ هل ترى أن التقنية والفلسفة المستخدمتين في برنامج الوتر الفائق تختلفان نوعياً وأساسياً عما كانتا عليه لدى أجدادنا؟**

إن أسلوب الفيزياء تغيَّر كثيراً في العقود الزمنية الأخيرة لأسباب عديدة أهمها التقدم الذي أحرزته الفيزياء النظرية في ميادين جديدة. فمنذ زهاء خمسين عاماً كانت نظرية الحقل الكمومية مجرد خليط فوضوي، ثم أحرزت تقدماً بمرور الزمن. كان التحسن في فهمها سبب نجاحها في ميادين جديدة وامتدادها إلى تفاعلات جديدة، واكتسبت مزيداً من الأسس الهندسية التي، إن لم تكن تضاهي أسس النسبية العامة، تشكل على الأقل إطاراً جديراً بالثقة.

لقد تقدمت الفيزياء بأسلوب أتاح لنا أن نكون أكثر طموحاً بشأن ما كان يعتبر جواباً شافياً عن مسألة فيزيائية. ومن الخير أن لا ننسى أن فيزيائيي القرن التاسع عشر لم يكونوا يأملون حتى في تفسير شفافية الزجاج أو خضرة العشب، ولا سبب انصهار الجليد في درجة حرارة انصهاره، وما إلى ذلك. لم تكن هذه جزءاً من الفيزياء في القرن التاسع عشر، ولم يكن فيزيائيوه يحلمون بإمكانية الإجابة عن أمثال تلك الأسئلة. كانت طموحاتهم محدودة. كانوا يأملون، بفضل بعض القياسات بخصوص مرونة المواد، أي يتمكنوا من حساب نتائج تجارب أخرى؛ أما أن يأملوا في التنبؤ بقض الأشياء وقضيضها من معادلات تصف الإلكترونات ونوى الذرات، كما نفعل اليوم، فذلك أمر لم يكونوا يجرؤون حتى على الحُلُم به.

كان تقدم الفيزياء يحدث دوماً بما يجعل مستوى فهم ما يستهدفه جيل راهن بعيداً عن أحلام جيل قبله أو جيلين. كانت فيزياء الجسيمات العنصرية قبل عشرين عاماً من الآن ما تزال خليطاً متفرقاً يضم تشكيلة كبيرة من الجسيمات العنصرية المكتشفة، ولم يكن يوجد بتاتاً إطار صحيح لتوصيفها. أما الإطار المرضي في توصيف القوى المعروفة، باستثناء الثقالة، فلم يظهر إلا في السبعينيات. وقد جلب ذلك شيئاً من الترتيب إلى فوضى عالم الجسيمات العنصرية

وخلق بيئة جديدة للتفكير في فيزياء هذه الجسيمات. ولئن كان لدينا اليوم أنواع شتى من الأسئلة المطروحة نواجهها بطرائق مختلفة، فما ذلك إلا بسبب التقدم الذي أحرز في تلك الحقبة وما سبقها.

**لقد صرَّح ستيفن هوكنغ *S.Hawking*، رغم أنه لم يكن يعني نظرية الأوتار الفائقة بل المحاولات المماثلة في إدراك تلك الأمور الأساسية جداً، أن الفيزياء النظرية أشرفت على نهايتها. هل تعتقد أن برنامج الأوتار الفائقة، إذا بلغ نهاية ناجحة ربما في السنين الخمسين القادمة، يمكن أن يصبح قمة الفيزياء النظرية؟ هل يمكن أن يستوعب الموضوع كله وإلى الأبد؟**

كان نموذج بور Bohr الذري أول محاولة حقيقية في ميكانيك الكم لتفسير طيف إصدار الهدروجين، عام ١٩١٤. وبعد ذرة بور كان واضحاً جداً أن في ميكانيك الكم شيئاً صحيحاً بخصوص ما يحدث في الذرة، لكن هذا الشيء لم يكن واضحاً. حصلت فترة اختلاط لم يتبيَّن فيها مآل ميكانيك الكم. كان الانطباع قائماً بأن ميكانيك الكم صائر إلى شيء حاسم لم يتصوره إنسان قط. ولم يتبين ما يمكن أن يفعله هذا الميكانيك الجديد، وما لا يمكن أن يفعله، إلا بعد ظهور معادلة شرودنغر عام ١٩٢٥، ولا مدى التأثير الجذري الذي أحدثه في الفكر البشري.

أعتقد أننا، مع النظرية الوترية، في فترة تشبه تلك؛ وأن معظم الناس، حتى المتحمسين لها، يبخسونها حقها من حيث قدرتها المستقبلية على تغيير مفاهيمنا بخصوص قوانين الفيزياء. ونحن لم نكشف إلا عن جانب من البنية ولم نصل بعد إلى لب الأشياء. ومرة أخرى، وكما حدث مع ميكانيك الكم، أعتقد أننا إذا لم نصل إلى لب أصول النظرية الوترية يصعب علينا التنبؤ بما ستؤول إليه حال الفيزياء النظرية. أرى أن الفيزياء النظرية ستصل إلى حال يصعب علينا اليوم تصورها. أما فيما يخص المشاكل التي ستنطرح في ذلك الوقت فلا رغبة عندي في أن أتكهن بها.

# 4

## ميكائيل غرين

ميكائيل غرين Michael Green أستاذ في قسم الفيزياء بمعهد الملكة ماري في لندن . ومن أعماله ، كواحد من رواد النظرية الوترية الحديثة وبالاشتراك مع جون شوارتز ، برزت هذه النظرية على مسرح الأحداث .

**هل نستطيع الانطلاق من العودة إلى الأيام الأولى للنظرية الوترية عندما كانت موضوعاً جانبيـاً ؟ وهل لك أن تقول باختصار كيف بدأ اهتمامك بها وماذا كنت تسعى إلى فعله في تلك الأيام ؟**

حسنٌ ، إن للنظرية الوترية تاريخاً طريفاً جداً ، لأنها اختُرعت في الأصل ، أو نشأت فائدتها ، في مجال من الفيزياء يختلف عن المجال الذي راحت تكتسب فيه أهميتها . كانت الأوتار في ذلك الوقت تهدف إلى توصيف الهدرونات ـــ الجسيمات شديدة التفاعل كالبروتونات والنترونات . وبكلام تقريبي تستطيع أن تفكر بهذه الجسيمات وكأنها مصنوعة من كواركات مربوطة بوتر معـاً . وقد نمت أهمية الموضوع في فيزياء التفاعل الشديد ، فيزياء تلك الجسيمات ، في أواخر الستينيات ، لاسيما بفضل أعمال فينيزيانو ، الفيزيائية الإيطالية . كنت في ذلك الوقت أعمل في أطروحة الدكتوراه ، وقد دُهشت فوراً بهذه الأفكار الجديدة الهامة. ويعود بعض السبب في ذلك إلى أنها كانت مختلفة جداً عن الأفكار المتعارف عليها المستندة إلى نظرية الحقل الكمومية التي أخفقت في التعامل مع ذلك الفرع من الفيزياء .

**إنه ، إذا جاز لي أن أقول ، يبدو نموذجـاً من نوع غريب ، هذا الذي يجب تطبيقه على فيزياء الهدرونات ، تلك الجسيمات ذات التفاعل الشديد ، عندما نتصور أنها تنطوي على أوتار صغيرة. ألا يبدو ذلك غريبـاً بعض الشيء ؟ هل تظن حقـاً أن تلك ستكون أوصاف الحقيقة ؟**

لم تكن الفكرة أن الجسيمات تنطوي على أوتار . بل كانت ، في تلك الأيام ، أن الجسيمات نفسها تشبه الأوتار . فالبيون مثلاً ، وهو واحد من الجسيمات الرئيسية التي تنقل القوة الشديدة ، يمكن أن يُعتبر ، بشكل تقريبي ، وكأنه كوارك وكوارك مضاد مرتبطان معاً بوتر . ولما كان الكواركان مترابطين معاً بفعل الوتر ، فإن ذلك قد يكون واحداً من الأسباب التي تحول دون فصل أحدهما عن الآخر .

**شيء يشبه الدمبل *dumbbell*(*) ، وهذا الشيء كله يمكن أن يئزّ ويدوّم ، على ما أظن ؟**

نعم ، هذا صحيح . الواقع أن هذه هي الصورة الأرجح التي برزت اليوم من النظرية التي تسمى الكرومودیناميك الكمومي ، وهي النظرية الحديثة في التفاعلات الشديدة . وهذا أيضاً ما يمكن اعتباره على شاكلة تلك الصورة الوترية القديمة .

**أي إن في توصيف الهدرونات الحديث بقايا باقية من أوصاف الصورة الوترية ؟**

نعم ، أعتقد أنها طريقة جيدة في التعبير عن ذلك .

**وماذا عن شأن الجسيم المؤلف من ثلاثة كواركات ، كالبروتون . ألا تحتاجون فيه إلى ثلاثة أوتار لربطها معاً ؟**

هذا صحيح ، وبسبب نتائج من هذا القبيل ، ومشاكل فنية أخرى أشد قسوة ، قُضيَ في النهاية على هذا التطبيق الخاص للنظرية الوترية .

الحقيقة أن تاريخ هذا الموضوع أغرب مما ذكرتُ ، لأن اقتراح فينيزيانو الأصلي كان مجرد تكهن بما يمكن أن يحدث في تصادم جسيمين شديدي التفاعل . لم يكن في ذهنها صورة وترية في ذلك الوقت ، لكنها قدمت تكهناً ملهماً حفز نفراً من الباحثين على الاهتمام ببنية النموذج الذي اقترحته . وتبين أخيراً ، بعد سنتين أو ثلاث ، أن هذه البنية تظهر من خلال صورة تتخذ فيها الجسيمات شكلاً وترياً .

**واضح ، كما تقول ، أن ذلك التطبيق الخاص للنظرية الوترية لم يذهب بعيداً ، برغم ما كان فيه من ملامح واعدة . فماذا حدث بعدئذ ؟ هل تلاشى الاهتمام بها ؟**

لقد تزامن تاريخها — أي في أوائل السبعينيات — مع الثورة التي نجمت عن فهم القوة الضعيفة في سياق نظرية موحدة للتفاعلين ، الضعيف والكهرطيسي . كما أن تقدماً هائلاً حصل في فهم القوة

---

(*) كرتان ثقيلتان يصل بينهما قضيب قصير ، أداة تستعمل تمرين عضلات الذراع . (المترجم)

الشديدة ضمن أفكار شبه متفق عليها ـــ أي بلغة نظرية الحقل الكمومية التي كانت الأداة الأساسية في الموضوع. وبسبب هذا التقدم النظري الهائل آنئذ، في فهم نظريات تلك القوى، وما تلاه أيضاً من فورة النجاحات التجريبية الشواهد على صحة تلك النظريات، انصرف اهتمام معظم الناس عن النظرية الوترية إلى تلك الميادين التي يعرفونها أكثر من سواها. لكن تلك الفترة كانت، في الوقت نفسه، فترة افتتان مجموعة من الناس بالنظرية الوترية. إن النظرية الوترية تبدو، بمجرد أن تتعلمها، ساحرة وأنيقة لدرجة تجعل من الصعب جداً عليك أن تصرف التفكير عنها. وأظن أن هذا الجانب هو الذي أغرى بها الناس أكثر من أي تطبيق مباشر لها في أي فرع خاص من فروع الفيزياء.

**لماذا؟ ما سرُّ نجاح النظرية الوترية؟ ما الجانب الساحر فيها؟**

يعود بعض السبب إلى أن النظرية تحوي أنواعاً من البنى تعودناها فيما نعتقد عادة أنه نظريات كمومية جميلة. فالفيزيائيون النظريون يحبون النظريات العيارية مثلاً؛ إنها نظريات تشبه الالكتروديناميك ونظرية القوة الشديدة، ونظرية أينشتاين الثقالية في الواقع؛ نظريات تُعتبر أنيقة كلها لأنها تنطوي على نوع من التناظر، اسمه التناظر العياري، يتيح للنظرية أن تكون متماسكة بطريقة لا تتاح لها بدونه.

**نحن نتكلم هنا عن خواص تناظر رياضية واضحة للفيزيائيين النظريين، لا لجمهور الناس؛ رغم أنها مصدر متعة لقلوب الفيزيائيين النظريين.**

نعم، هذا صحيح بمعنى ما. إذ من الصعب جداً توصيف الأشياء ذات الامتداد بكلام يتفق مع نظرية أينشتاين في النسبية الخاصة. وللوهلة الأولى، تعاني النظريات من مشاكل مرعبة يرى المرء أنها تجعل النظريات غير متماسكة منطقياً.

**ما نوع هذه المشاكل؟**

أكثرها بروزاً هو ما يبدو، سطحياً، من أن النظريات تتكلم عن أوتار ذات أساليب اهتزاز غير فيزيائية. إنها لا تهتز في المكان فقط بل وفي الزمان أيضاً. إنها تتلوى باتجاه لا نرى له معنى، باتجاه شبه زمني.

إن الجانب الساحر في النظريات الوترية المبكرة كان أنها، برغم احتوائها على هذه المعضلة الظاهرة، تتحاشاها بطريقة تذكِّرك بطريقة اجتناب المعضلة المماثلة في نظرية مكسويل الكهرطيسية. لكنها تتحاشاها بطريقة أكثر مهارة بما لا يقاس، لأن المشكلة أدهى بما لا يقاس. ونجاحها في هذا الصدد أمر يلفت النظر.

**كيف تم ذلك؟**

لتحاشي تلك التعارضات الظاهرية نعلم أن النظرية لا يكون لها معنى إلا إذا تحققت بعض الشروط ، وبالتحديد إذا كان الوتر متحركاً في المكان والزمان الذي يثبت فيه البعد المكاني عند قيمة معينة . كان للمكان ، في النسخة الأصلية للنظرية الوترية ، خمسة وعشرون بعداً ، وللزمكان إذن ستة وعشرون بعداً . أما أحدث النظريات فتعمل في تسعة أبعاد مكانية ، أو عشرة زمكانية .

**ماذا كان شعور الناس في تلك الفترة المبكرة؟**

كانوا يعتبرون ذلك كارثة ، لأننا نعيش فيما يبدو لنا عالماً ذا ثلاثة أبعاد مكانية وواحد زمني . فكان ذلك وصمة كبيرة في طباع النظرية الوترية في ذلك الحين .

كان هناك أيضاً مشكلة أخرى أكثر قسوة ، في رأيي ، لأنها كانت تعارضاً حقيقياً . وبالتحديد كانت هذه النظريات تحوي جسيمات تسير بأسرع من الضوء ، اسمها تاخيونات . فإذا كنت لا تكترث بميكانيك الكم يصبح وجود هذه الجسيمات شيئاً يمكن التفكير به ، أما في النظرية الكمومية فلا يبدو ممكناً إيجاد معنى لجسيمات من هذا القبيل .

**إن من الناس من أصبحت نظرية النسبية مألوفة لديهم ؛ فهي تقول فيما تقوله بأن وجود أشياء متحركة بأسرع من الضوء نذير شؤم على صعيد مبدأ السببية *causality*.**

نعم ، لكن ذلك قد لا يكون شراً كله . فأنت تستطيع تجاوز ذلك في نظرية تقليدية ، وذلك ببساطة إذا كان اللقاء محظوراً بين جسيم أبطأ من الضوء وآخر أسرع من الضوء . لكن المشكلة الحقيقية تبرز في النظرية الميكانيكية الكمومية ، لأن مفهوم الحالة ذات الطاقة الدنيا لمنظومة ما يفقد معناه إذا كانت التاخيونات موجودة . إن الحالة التي نسميها فضاءً خالياً — الخلاء — تصبح عندئذ قلقة لأنها غير عاجزة عن التفكك إلى تاخيونات . أي ، بتعبير آخر ، إن الخلاء لا بدّ أن يتفجر إلى ما لا يحصى من الشظايا التاخيونية . ولذلك ترانا لا نستطيع إعطاء معنى لنظرية تنطوي على أمثال هذه الجسيمات .

**إذن كان الوضع على ما ذكرت إلى أواسط السبعينات ، أليس كذلك؟**

نعم ، صحيح . في أواسط السبعينيات كان كثير ممن عملوا في هذا الحقل مشدوهين بالتقدم الذي طرأ على النظريات الأخرى المألوفة أكثر في ذلك الوقت ، كما ذكرت سابقاً . ولو تتبعتَ بكل عناية نشاطات ذلك الجمهور من الفيزيائيين لرأيت أن أبحاثهم سارت عموماً في طريقين . كان أحدهما يقتصر في ذلك الحين على تنمية فهم النتائج في مجال النظريات العيارية المتعارفة التي ذهبت رياضياً

إلى أبعد مما كان معروفاً قبلها. فقد اتضح مثلاً كيف تحوي هذه النظريات وحيدات القطب المغنطيسي ــ الشحنات المغنطيسية ــ بمهارة كبيرة، بطريقة لم يتوقعها أحد من قبل. أما الطريق الجديد الثاني، في البحث النظري، فكان التناظر الفائق.

**ما التناظر الفائق بالضبط؟**

إن مبادئ التناظر تؤدي دوراً هاماً جداً في نمو فيزياء الجسيمات العنصرية، لاسيما بسبب أنها تُبرز تشكيلة من الخصائص تربط ما بين جسيمات ذات مظاهر متخالفة. وبمجرد اكتشاف هذه التشكيلة يستنبط المرء مفتاح دراسة بنى القوى الكامنة في أعماقها. وكمثال جيد على استخدام التناظر في العلم نذكر كيمياء القرن التاسع عشر. فقد أوضح مندلييف Mendeleev في القرن الماضي أن بالإمكان ترتيب العناصر الكيميائية في أصناف ذات خصائص مشتركة.

**الجدول الدوري المشهور.**

نعم. إن الجدول الدوري يحوي أصنافاً من العناصر، ولعناصر الصنف الواحد صفات مشتركة، ولم يُفْهم الأساس الذي يعتمد عليه تصنيف هذه العناصر، التي يقارب عددها المئة، إلا بفكرة أن العناصر مصنوعة من ذرات. وقد تبين أن هذه الأصناف تبرز من حقيقة فيزيائية واحدة هي القوة الكهربائية التي تمسك بالإلكترونات في مداراتها حول النواة.

والأمل في فيزياء الجسيمات أن نستطيع العثور، من خلال تصنيف الجسيمات وفق خصائصها، على مفتاح فهم القوى الكامنة في أعماقها.

إن دراسة القوى بين هذه الجسيمات قطعت مسافة طويلة؛ ونحن نفهم اليوم القوة الشديدة والقوة الكهرضعيفة، اللتين بفضلهما يمكن تصنيف الجسيمات بطريقة ما. فكان أن حصلنا في أواسط السبعينيات على صنفين متمايزين. ذلك أن للجسيمات خاصية أصيلة اسمها السبين، وهو ضرب من العزم الزاوي ــ بصورة مبسطة جداً تستطيع أن تتخيل أن الجسيم يدور على نفسه حول محور منه ــ أما في ميكانيك الكم فإن هذا السبين لا يمكن أن يأخذ سوى قيم متقطعة من وحدة معينة. والجسيمات التي سبينها يساوي عدداً صحيحاً من هذه الوحدة تسمى بوزونات. أما تلك التي سبينها يساوي عدداً نصف صحيح من هذه الوحدة فتسمى فرميونات.

وبرغم إدراكنا لوجود هذين الصنفين ظللنا، حتى أواسط السبعينيات، لا نعرف بأي معنى يمكن ربط البوزونات والفرميونات برباط تناظر من نوع ما. وبتعبير آخر، بدا أن الفرميونات تختلف عن البوزونات تماماً وأننا، إذا أردنا أن نفهم بعمق أصل الجسيمات كلها بالاعتماد على مبدأ واحد، علينا أن نفهم العلاقات بين هذين الصنفين الجسيميين.

أما الآن فإن التناظر الفائق، الذي ظهر في النظريات في أواسط السبعينيات، هو تناظر يربط بين الفرميونات والبوزونات ومن شأنه، إذا كان تناظراً لقوانين فيزيائية، أن يجعل من هذين الصنفين الجسيميين المختلفين ظاهرياً وجهين مختلفين لشيء واحد.

**وأن الصفة «فائق» في الأوتار الفائقة، نابعة من التناظر الفائق الذي ينتمون أليس كذلك؟**

صحيح تماماً.

**ما أثر تطبيق التناظر الفائق على النظرية الوترية القديمة؟**

أثر مدهش بما فيه الكفاية. إذا أخذت نسخة من النظريات الوترية القديمة، ثم عدّلتها بما يجعلها فائقة التناظر، فإنك تتخلص فوراً من مشكلة الجسيمات الأسرع من الضوء. ستجد نظرية نظيفة من هذه الجسيمات وتبلغ من التماسك درجة لم تبلغها من قبل.

**هل حدث، عند هذه المرحلة، إدراك عام بأنكم كنتم بصدد شيء أكثر إثارة حقاً؟**

لقد حدثت فجوة في تطور النظرية بين عامي ١٩٧٦ و ١٩٧٩ تخلى أثناءها الجميع تقريباً عن متابعة البحث في الموضوع. وهذا أمر غريب نوعاً ما؛ لأن النشرة الأولى، وقد ظهرت عند بدء تلك الفجوة عام ١٩٧٦ (وتحمل تواقيع جويل شيرك و فرديناند غليوزي F.Gliozzi وديفيد أوليف D.Olive)، أوحت بإمكانية أن يكون التعديل الذي يجلبه التناظر الفائق مهماً، لكن هذا الموضوع ظل دون متابعة وأصبح في حكم الميت.

في عام ١٩٧٩ بدأتُ العمل مع جون شوارتز واستأنفنا فكرة صنع نظريات وترية فائقة التناظر. كنا معجبين بأن النظرية ظهرت متماسكة بهذا الصدد. ويجب أن أعترف بأن قلة قليلة من زملائنا كانوا في ذلك الوقت مهتمين بالموضوع، وذلك أيضاً وجوهرياً بسبب ماطرأ من تطورات في حقل آخر كان يبدو واعداً ــ حقل الثقالة الفائقة، أي تطبيق التناظر الفائق على الثقالة. ولم يكن قد اتضح للعاملين في هذا الحقل أن النظرية الوترية أفضل استثماراً للجهود المبذولة في سبيل فهم هذا الحقل.

**ما الذي دعاك إلى التفكير بدمج التناظر الفائق والنظرية الوترية معاً؟ يمكن أن أتفهم اهتمامك السافر بالنظرية الوترية، لكن هل كان ذلك الدمج ضرورة واضحة، أي محاولة جعل النظرية الوترية ذات تناظر فائق؟**

أظن أن الأمر كان هكذا بأسلوب ما. أعني أن إدخال التناظر الفائق في كل شيء كان «موضة» في تلك الأيام! كان التناظر الفائق يبدو كفكرة جميلة جديدة على الفيزياء لأنه كان حقاً حلقة

الوصل الأخيرة ، بمعنى عام ، في عملية توحيد كل أجناس الجسيمات . إذ لم نكن نفهم قبل ذلك كيف يمكن أن نجد تناظراً يكون صلة وصل بين جسيمات مختلفة السبين ؛ فكان التناظر الفائق الصلة المطلوبة لحدوث ذلك الفهم . وهكذا بدا ، من اعتبارات نظرية بحته ، أن شيئاً كالتناظر الفائق ضرورة جوهرية لكل نظرية تهدف إلى توحيد الجسيمات ، برغم عدم وجود أي واقع تجريبي يكشف عن وجود مثل هذا التناظر في الطبيعة حتى الآن .

**هل كنت تتوقع ، عندما باشرت هذا العمل ، أن تصل إلى نتائج حاسمة ، أم أنك دُهشت عندما بدا لك أن الأمور تسير على ما يرام ؟**

أعتقد أننا ، في السنتين الأوليين من تحري هذه النظريات ، كنا ما نزال مشدوهين من واقع أن دراستها بتفصيل متزايد كانت تقود إلى طرائق متزايدة العدد في جعل تلك النظريات متماسكة .

وفي تاريخ معين تماماً تولدت لدينا قناعة بأننا كنا على طريق شيء مهم جداً ، وكان ذلك في آخر عام ١٩٨١ . فقد أثبتنا أن حساباً كمومياً في واحدة من تلك النظريات الوترية الفائقة يعطي نتيجة غير عديمة المعنى . وأنا أقول ذلك بهذه الطريقة لأنها نظريات تحوي الثقالة ، وكانت كل نظريات الثقالة الكمومية المعروفة حتى ذلك الوقت تقود إلى نتائج عديمة المعنى فيما أتحدّث عنه الآن .

**ماذا تقصد بأنها عديمة المعنى ؟**

أقصد أنك إذا حاولت أن تحسب ، في هذه النظرية ، احتمال لقاءٍ تبعثريٍّ بين جسيمين ستجد دوماً قيمة لا نهائية الكبر . هذا ما أعنيه بعبارة « عديمة المعنى » .

**وفي حساباتك وجدت أنك يمكن أن تحصل على جواب محدد ؟**

لقد اكتشفنا ، على الأقل في أبسط تقريب تناولنا به واحدة من النظريات التي فحصناها ــ كانت نظرية لا تحوي سوى أوتار مغلقة ــ أن تلك النظرية كانت بالفعل متناهية . وهذا مدهش جداً لأنها كانت نظرية تحوي الثقالة أيضاً . ونظريات الثقالة المعروفة المستندة على نسبية أينشتاين العامة تقود إلى مشاكل فظيعة ، حتى في أخفض مراتب التقريب تلك . وهكذا أصابتنا عند هذه النقطة دهشة كبيرة حين شعرنا أننا كنا على الأرجح بصدد شيء مهم لم يسبق له مثيل .

**دعني أستوضح ذلك . لقد خرجت النتائج المنتهية من حسابات تقريبية ، وتقريبية فقط . هل تستطيع أن تقول إن النظرية متماسكة دون أدنى ريب ؟**

كلا . مؤكد أن ما كنا نهتم به آنئذ ، والذي ما زال موضع الاهتمام الآن ، هو المحدودية في ظروف تقريبية من النظرية الكاملة .

**كيف كانت استجابة الناس إلى هذا الاكتشاف المبدئي ؟**

الحقيقة أن قليلاً منهم اهتموا به . كانت هذه النتيجة تستحق الاهتمام بالتأكيد ( لدى بعض الناس على كل حال ) نظراً لوجود عدد لا يستهان به من الناس العاملين آنئذ في الثقالة الفائقة ، وهو موضوع كان يشكل محاولة لصوغ ميكانيك كمومي يضم الثقالة . لكن الناس تجاهلوها بالفعل ، باستثناء واحد أو اثنين أبديا دهشة صادقة أمام هذه النتيجة ، لا سيما إدوارد ويتن . والواقع أنه ذهب ، بالاشتراك مع لويس ألفاريز ــ غوميه L.Alvarez-Gaumé ، إلى حد إثبات أن من المعقول جداً أن تكون النظرية الوترية نفسها نظيفة ، لا من اللانهائيات فحسب بل ومن المشكلة الأخرى التي تنوء بها نظريات الثقالة الكمومية ، أي الشذوذات تحديداً . وبالنظر للأسباب التي دعتهما إلى تفحص ذلك اتضح أنهما كانا مهتمين جداً عند هذه المرحلة . لكنهما كانا الاستثناء ، على ما أعتقد . ذلك أن الغالبية العظمى أحست بأن النظرية الوترية كانت بعيدة جداً عن النظريات المطروحة في الحقل الكمومي .

**إن النظرية التي برهنتم على محدوديتها ، في أولى مراتب التقريب على الأقل ، تخص أوتاراً مغلقة كما ذكرت . لكن الأوتار المغلقة كانت تُعتبر في ذلك الوقت عديمة الفائدة في نظرية تسعى لتقديم معلومات عن العالم الحقيقي . هل هذا صحيح ؟**

نعم . ولكي لا أظلم الناس الذين تجاهلوا أعمالنا أعترف بحقيقة أن النظرية الخاصة ، التي هي نظرية أوتار مغلقة فقط ، لم يكن يبدو أن من شأنها أن تتيح اتصالاً بقوانين الفيزياء ، باستثناء قوة الثقالة . ذلك أنها لا تملك ، بالإضافة إلى قوة الثقالة ، بنية تكفي للعثور فيها على أوصاف القوى الأخرى باستخدام تلك النظرية ، برغم أن ذلك لم يكن واضحاً تماماً . والواقع أن ذلك غريب بعض الشيء ، لأن أحدث أنواع النظريات الوترية المكتشفة هي أيضاً نظريات تحوي أوتاراً مغلقة فقط . إنها ، إذا شئت ، تعميمات للنظرية التي كنا نبحث فيها آنئذ . وهذه التعميمات تنطوي بالفعل على بنية أغنى ، وهذه الأنواع النظرية الأحدث ، المعروفة باسم النظريات الوترية المتغايرة ، هي التي يعتقد معظم الناس بقدرتها على شرح القوى الأخرى .

**قد يكون علينا أن نناقش قليلاً كثرة أنواع النظريات الوترية الفائقة الموجودة . فليس هذا ، لأول وهلة ، بشير خير ، لأن الذي يبحث عن نظرية كل شيء يأمل في أن يجد نظرية واحدة لا غير . فما عدد النظريات الوترية المختلفة بالضبط ؟**

هذا يتوقف على طريقتك في العد. فبإحدى طرائق العد لا يوجد سوى أربع أو خمس ؛ لكن هذه الطريقة قد لا تكون حقـاً طريقة العد الصحيحة ؛ وفي طريقة عد أخرى قد تستدل على وجود عدة آلاف في الوقت الحاضر.

وسبب قولي إن عددها يتوقف على طريقة العد هو أن هذه الآلاف العديدة هي إلى حد ما أقرب إلى أن تكون نسخـاً متباينة من الأربع أو الخمس.

لكنني أريد أن أشير إلى أن هذا الموضوع ، برغم ما فيه من نذير شؤم بسبب كثرة عدد النسخ ، ما يزال حقـاً في طفولته ، وأنك كلما ازددت في دراسة جوانب أخرى من النظرية الوترية تكتشف أن فيها صعوبات جديدة ظاهرية لا بد من تذليلها ؛ وتذليلها يقتضي أن تكون النظرية أكثر تخصصـاً بكثير مما تظن في بادئ الأمر.

**هل تريد أن تقول إن النظريات الوترية العديدة المتنافسة ما تزال ناقصة بمعنى ما. وأن الفهم الكامل لكيفية عملها قد يودي ، عندما يحين زمنه ، ببعضها إلى التهلكة ، لأن هذا البعض سيكون عاجزاً عن إعطاء تفسير متماسك لما يحدث في هذا العالم؟**

ذلك هو إحساسي الشخصي وهو يستند إلى تاريخ الموضوع في أيامه الأولى. ففي نحو عام ١٩٨٢ مثلاً ، عندما ثار فينا الحماس بسبب ما تبين من محدودية هذه النظريات ، اعتقدنا أن كل النظريات الوترية محدودة حتمـاً. وفي ذلك الوقت فكرنا بأن لنا الخيار في إدخال تناظرات اختيارية في تلك النظريات من أجل قوى الطبيعة الأخرى باستثناء الثقالة. وفي تاريخ توحيد القوى ، في أواخر السبعينيات ، كان الناس يشعرون بأن في الأمر شيئـاً أسموه نظرية التوحيد الكبير أو تناظر التوحيد الكبير ، وهو تناظر عظيم يتخذ شكل علاقات رياضية تترابط فيها كل الجسيمات التي نراها في الطبيعة وتشتمل على كل القوى ، باستثناء الثقالة ، في مخطط واحد.

أما الآن ، في تناول موضوع التوحيد الكبير ، فيُعمد إلى انتخاب تناظر معين على أساس معلومات تجريبية بدلاً من أسباب نظرية. لم يكن يوجد في تلك الأيام سبب نظري لانتخاب نوع معين من التناظر يربط بين الجسيمات بدلاً من سواه ؛ وبما أننا كنا متأثرين جداً بمعتقداتنا بخصوص طريقة عمل نظريات التوحيد الكبير ، كنا نشعر بأننا يحق لنا أيضـاً أن نُدخل تناظراً اختياريـاً يضم كل أجزاء النظرية الوترية الفائقة غير الثقالية. إن أي واحد من تلك التناظرات صالح كأي واحد سواه ، لكن علينا فوق ذلك أن نختار أحدها بالاعتماد على أسس تجريبية إن أمكن. لكن لم يكن هذا هو الذي حدث. وهكذا لدينا هنا مثال يظهر فيه أن هناك مجموعة لا نهائية من النظريات الممكنة ، بتناظرات مختلفة ، لكننا اكتشفنا بعدئذ أن عدداً محدوداً جداً منها متماسك حقـاً.

**ما الفرق إذن بين وتر متغاير وتلك الأنواع من الأوتار التي كانت في ذهنك عام ١٩٨٢؟**

إن النظريات المتغايرة مخلوقات غريبة . يمكن اعتبارها نظريات مركبة من أقدم نظرية وترية ، تلك التي كانت تدعى النظرية الوترية البوزونية ، من جهة ، ونظرية وترية فائقة من جهة أخرى . وعلى هذا فإن الوتر المتغاير يضم النظرية الوترية التي تعمل في ستة وعشرين بعداً زمكانياً وأخرى تعمل في عشرة أبعاد ! إن هذا ليس له معنى ، بالطبع . فأنت لا يحق لك أن تتخذ عددين مختلفين من الأبعاد الزمكانية من أجل الوتر نفسه . والذي حصل فعلاً هو أن عشرة ، من ستة وعشرين بعداً ، هي أبعاد زمكانية عادية ، أي إن الوتر يتموج في زمكان ذي عشرة أبعاد . وزيادة على ذلك يوجد ستة عشر بعداً تسمى داخلية . وهذا يقود إلى بنية فوقية في النظرية التي يجب أن تحوي أوصاف القوى الأخرى ، القوى غير الثقالية . وهكذا يوجد بالأحرى صورة هندسية لمصدر هذه القوى الأخرى . إنها تأتي من واقع أن طرح عشرة من ستة وعشرين يعطي ستة عشر ! فهذه الأبعاد الستة عشر المحقونة مسؤولة عن بعض التناظرات في النظرية . تُعرف هذه التناظرات بالاسمين SO(32) و $E_8 \times E_8$ ، وهما اسمان رياضيان للعلاقات بين الجسيمات في النظرية . إن SO(32) و $E_8 \times E_8$ زمرتا تناظر رياضيتان تواكبان مواكبة طبيعية ، في النظرية المتغايرة ، الأبعاد الستة عشر المحقونة بين النظرية الوترية البوزونية والنظرية الوترية الفائقة .

**هل صحيح إذن أن الأبعاد الفوقية الستة عشر ، في النظريات المتغايرة المذكورة ، مرتبطة على نحوٍ ما بالقوى غير الثقالية ؟**

نعم ، إن الفرق بين النظريات الوترية الفائقة المتغايرة وبين سواها من النظريات الوترية التي لها بعض الحظ في الاتصال بالفيزياء ــ بعض نظريات الوتر المفتوح تحديداً ــ هو أن الشحنات المسؤولة عن القوى ــ كالشحنة الكهربائية والشحنة المسؤولة عن القوة الشديدة وما إلى ذلك ــ في نظريات الوتر المفتوح تسكن النقطتين الطرفيتين من الوتر . أما في النظريات المتغايرة فليس للأوتار نقاط طرفية ، لأنها أوتار مغلقة ، ويمكن للمرء أن يفكر بالشحنات وكأنها متفشية على الأوتار . ذلك هو الفرق الرئيسي الفيزيائي بين هذين النوعين من النظريات .

**كيف هي صورة الإلكترون في لوحة الأوتار المغلقة ؟ إن الإلكترون جسيم مشحون ؛ هل يجب أن نعتبر شحنته متفشية على طول الوتر ؟**

في نظرية وتر مغلق من النوع المتغاير يمكن أن نقول إن هذه الصورة صحيحة . ويمكن للوتر أن يهتز في أي شكل من أشكال المدروجات التي لا تحصى ، وكل تواتر اهتزازي منها يقابله جسيم أو مجموعة جسيمات . إن الجسيمات التي نلحظها اليوم بالفعل في الطبيعة ، كالإلكترون

أو الكواركات أو الفوتون أو الجسيمات الأخرى، هي كلها على الأرجح أخفض الأشكال الاهتزازية الممكنة للوتر، أو بمعنى ما شكل الوتر وهو غير مهتز بتاتاً.

**تقول إن الجسيمات الموجودة في الطبيعة تتعلق كلها بشكل وتري غير مهتز. فكيف يمكن إذن لوتر غير مهتز أن يقود إلى كل تلك الأنواع الجسيمية المتباينة؟**

حسن، إن في النظرية الوترية أكثر من صورة بسيطة لوتر مهتز في الفضاء. وفي أول نظرية وترية كانت تلك الصورة البسيطة صحيحة، لكن تلك النظرية لم تكن تحوي الجسيمات التي نعرفها، وكان فيها أيضاً عيوب أخرى. أما في أكثر النظريات واقعية، نظريات الوتر الفائق، فيوجد بنية فوقية بالإضافة إلى أن الوتر يمكن أن يهتز في الفضاء. وهناك شحنات، كالشحنة الكهربائية والشحنة الكهرضعيفة وسواهما، تسكن على الأوتار؛ وهذه الشحنات هي أساس الاختلاف بين الجسيمات، كالإلكترونات والنترينو والكواركات، الخ. وعلى هذا فإن كل نوع اهتزازي للوتر في الفضاء يتعلق بمجموعة من الجسيمات، لا بجسيم واحد فقط. فالحالة الأصلية للوتر، أي حالته القاعدية دون اهتزاز، لا تمثل جسيماً واحداً فحسب، بل عصبة من الجسيمات، وهذه هي الجسيمات التي يُفترض أن نراها في المختبر.

**إذا كنت، بقصد تفسير كثرة الجسيمات، تستند على فكرة أن الشحنات يمكن أن تتوزع بأشكال عديدة، ألا ينزع هذا عن النظرية الوترية إحدى مزاياها، تلك التي تدعي تفسير كل شيء، كالشحنة الكهربائية، بلغة الهندسة؟**

لقد هدفت من استعمال تلك اللغة في وصف النظرية إلى شرح النتائج بطريقة بدهية. وليس للمرء الحرية في اختيار توزع مثل تلك الشحنات. أما طريقة ظهور هذه الشحنات وكيفية توزعها فتعينهما النظرية بكل وضوح. ولا يمكن أن تتفق مع ميكانيك الكم سوى النظريات التي تنطوي على شحنات محددة جداً وموزعة بشكل معين. فليس باستطاعة المرء أن يتكلم كيفما اتفق عن أوتار ذات شحنات موزعة حسب هواه. فالنظريات المتماسكة هي النظريات المحددة وحدها.

**كم نوعاً من الشحنات يوجد؟**

إن النظريات التي نوقشت في الأصل تضم التناظرين SO(32) و $E_8 \times E_8$؛ ولهما 16 نوعاً مختلفاً من الشحنات و 496 جسيماً عيارياً كالفوتون تنقل القوى التي تسلطها تلك الشحنات. وليس للمرء حرية في تغيير الأشياء حسب هواه ضمن هذه الأنواع من النظريات. وهذه السمة تميز النظرية الوترية عن أنواع النظريات الأقدم منها التي تستند على جسيمات نقطية.

**إذن فالشحنات التي تتحدث عنها ليس لها بالضرورة علاقة بالنوع الذي يعهده معظم الناس، كالشحنة الكهربائية.**

إن من ضمنها الشحنة الكهربائية وكذلك الشحنتين الضعيفة والشديدة . وفي سبيل البحث عن أوصاف موحدة يمكن للمرء أن يحاول رسم صورة تتوحد فيها كل أنواع الشحنات ضمن بنية أكبر ، وستنطوي هذه البنية على أوصاف جسيمات جديدة ذات شحنات أخرى بالإضافة إلى الشحنات التي نراها مباشرة في المختبر . بعض هذه الجسيمات يمكن أن تُرى ، وقد يكون لبعضها كتل كبيرة لدرجة قد تحول دون رؤيتها . والنظريات التي كانت على بساط البحث منذ سنتين أو ثلاث تنطوي على ذلك العدد الضخم ، 496 جسيماً عيارياً ، منها ما رأيناه ومنها كثير لم نره .

**علمتُ أن فرصة سنحت حين خرج العدد 496 من حسابات قمتَ بها ، وعندما ذاع خبر ذلك شعرت فجأة أنك كنت بصدد شيء مهم . هلا رويت لي ذلك ؟**

حسن ، في صيف ١٩٨٤ بلغت ، بالاشتراك مع جون شوارتز ، مرحلة تساءلنا فيها هل كانت النظريات الوترية المرشحة لتكون ذات نفع في الفيزياء متماسكة ، أي هل تحوي شذوذات أم لا . كان يوجد في ذلك الوقت أدلة قوية ، مستمدة من أعمال عامي ٨١ و ٨٢ ، على أن نظرية الوتر المغلق متماسكة ، لكنها غير ذات علاقة مباشرة واضحة بالفيزياء . كنا نتوقع أن تكون نظريات الوتر المفتوح ، أي تلك التي تملك حظاً في أن تكون ذات نفع في الفيزياء ، نظيفة تماماً من مشكلة الشذوذات . لكن ذلك التوقع لم يكن يستند إلى أي مبرر سوى أنه أمنية نحب أن تتحقق . أعتقد أن معظم الناس الآخرين كانوا يتوقعون أن تعاني النظرية الوترية على الدوام من مسألة الشذوذات ، لأن الشذوذات كانت تبدو ، لأسباب عامة جداً ، شراً لا تستطيع النظرية الوترية أن تتحاشاه . أما نحن ، ومن منطلق تفاؤلنا الكبير ، فقد كنا نشعر أن النظرية الوترية تملك من السحر ما قد يجنبها مشكلة الشذوذات ؛ وقد دُهشنا عندما اكتشفنا أن الحقيقة تكمن عملياً بين الرأيين . فقد تبين أن كل النظريات الوترية تقريباً معلولة فعلاً ، أي تنطوي ، كلها تقريباً ، على شذوذات . لكن كان من بين ما درسناه منها واحدة مفردة نظيفة من تلك العلة . وعندما اكتشفنا ذلك احترنا في أمره ، لأن طريقة اكتشافنا له تترك الباب مفتوحاً أمام إمكانية أن يكون ذلك مصادفة ، لأننا كنا نتحرى أمر نوع معين من الشذوذ من ضمن كثير غيره . وفي النهاية أجرينا ذات يوم حساباً بعناية أكبر تحرينا بوساطته كل الشذوذات الممكنة دفعة واحدة ، ولنجاح هذا الحساب كان لا بدّ من إجراء اختزال عجيب بين عدة أعداد متميزة محتملة ، وبجمع هذه الأعداد تبين أن الجواب يجب أن يكون 496 . وذلك هو الذي حصل بالفعل !

**هل تستطيع أن تخبرني الخبر اليقين الراهن عما إذا كانت هذه النظريات محدودة أم لا ، لأنني سمعت هنا وهناك أن هذا الأمر مايزال موضع جدال ؟**

حسن ، إن الموقف لم يتضح بعد ، لكنني أعتقد أن هناك إجماعاً حول ما يُتوقع حدوثه . إن النظرية الوترية كانت وما تزال تعتبر عملية تقريبية . ونحن لم نحلَّ قط بشكل دقيق أية نظرية وترية . وهذه العملية تتخذ عادة شكل مراحل تقريب ذات دقة متزايدة ، وعلى المرء أن يتساءل في كل مرحلة عما إذا كان آخر تقريب ما زال يعطي جواباً محدوداً ، لأن المشاكل يمكن أن تبرز في أية مرتبة من هذه العملية .

لقد فحصنا في الأصل أخفض رتبة تقريبية ، أي أبسط تقريب يمكن فحصه ، فكان الجواب محدوداً . كان ذلك مدهشاً بحد ذاته ، لأن أياً من النظريات الثقالية الكمومية حتى في ذلك المستوى لم تُعط قط جواباً شافياً . لكن ما من أحد اضطلع حتى الآن بالبرهان على أن كل المراتب الممكنة في عملية التقريب هذه من أجل هذه النظريات ، تعطي أجوبة شافية . أما النظرية الوترية فتعمل بطريقة تجعل من المعقول جداً ، إذا تبين تماسك النظرية في أخفض مراتب التقريب ، أن تظل متماسكة بهذا المعنى في كل مراتب عملية التقريب . وعلى هذا فبالرغم من وجود مسألة معلقة ومن أن هناك أناساً عديدين يحاولون جاهدين أن يكتشفوا لماذا يجب أن تظل هذه النظريات متماسكة في كل المراتب ، أظن أن الناس يعتقدون عموماً بأنها سوف تظل كذلك — على الأقل ما كان منها متماسكاً في المرتبة الأولى . لكن هذه الدراسة ذات نفع كبير على كل حال . فمن خلال محاولة حل هذه المسألة في كل مراتب إجراءات التقريب يكتشف المرء في النظرية خصائص تذهب إلى أبعد من أية خطوة تقف عندها رتبة التقريب . ذلك هو واحد من الموضوعات الرئيسية في المرحلة الراهنة من الأبحاث في النظرية الوترية .

**لنعد إلى السرد التاريخي . كنتَ في عام ١٩٨٢ قد اكتشفت فجأة أن بإمكانك الحصول على أجوبة شافية في الحسابات الثقالية ، بل وركبت هذا المركب العظيم معتقداً أنك ربما كنت على وشك أن تجد خصائص فيزياء التفاعلات الشديدة .**

لم يكن الأمر كذلك حينئذ . فبمجرد أن جُعلت النظرية فائقة التناظر أي ، بتعبير آخر ، فور أن حصلنا على بنية نظرية الوتر الفائق أصبح واضحاً أنها تحمل بشكل ما علاقة وثيقة بنظريات الثقالة الفائقة .

**واضح أنك تتنبأ منذ الآن بأن أوصاف الثقالة ستخرج من هذه النظريات .**

إننا نعلم بالتأكيد أن النظرية تحوي الثقالة الفائقة بشكل ما . إن الثقالة الفائقة محتواة ، كعملية تقريب ، في النظريات الوترية الفائقة . إنها تقريب غير متماسك بحد ذاته ، لكن القول بأن الثقالة الفائقة قطعة من نظرية الوتر الفائق ليس هراءً .

**فإنشاء هذا الشيء الجديد يذهب إذن إلى أبعد من أفكار الثقالة الفائقة التي كانت ذات شعبية كبيرة في ذلك الوقت.**

صحيح. إن النظرية الوترية تختلف جذرياً عن أي من النظريات التي سبقتها، وذلك ببساطة لأن كل النظريات التي سبقتها ـــ من نظرية مكسويل الكهرطيسية الكهردينامية إلى النسبية العامة والثقالة الفائقة ـــ تحوي جسيمات، كالفوتون والغرافيتون والكواركات والجسيمات الأخرى، ذات كينونة نقطية، جسيمات ليس لها بنية داخلية. لكن النظرية الوترية تختلف عن ذلك في أن مكنوناتها أشياء ذات امتداد ـــ أي أوتار. ولئن كان هذا الفرق يبدو سمات عادية «دنيوية» جداً، إلا أنه في الواقع فرق هائل على صعيد بنية النظرية.

**هل من السهل أن نفهم كيف يتجلى هذا الفرق؟**

يمكن أن أعطي ملامح الدليل على أن هذا الفرق كبير الشأن. فمن المربك جداً، إن لم يكن من المستحيل، التعامل مع الأشياء النقطية في ميكانيك الكم. وفي شرح ميكانيك الكم لغة تعتمد على ما يسمى مبدأ الارتياب، وباستخدام هذا المبدأ يصبح من السهل البرهان على ما يلي: كلما كان المدى المكاني الذي تحاول توصيف الأمور فيه صغيراً، ازداد الارتياب في طاقة ما تحاول توصيفه. وهذا يعني في النظرية الثقالية أنك عندما تحاول معرفة الأشياء ضمن مسافات بالغة الصغر (أعني بكلمة بالغة أنها قصيرة لدرجة لا تصدق، حتى بالمقارنة بحجم البروتون) ستجد أن التفاوت في طاقة ما تريد دراسته قد يكون كبيراً بما يكفي لصنع ثقب أسود صغير. فإذا تأملنا إذن في عملية رصد مدى مكاني بالغ الصغر جداً (من رتبة ما يسمى طول بلانك، وهي $10^{-33}$ سنتيمتراً) نرى أننا مضطرون إلى القبول بأن الفضاء الخالي نفسه يتصرف وكأنه بحر لا نهائي تضطرب فيه ثقوب سوداء، تنشأ وتختفي في فترات زمنية بالغة الصغر. إن هذا بالطبع يغيِّر جذرياً في أذهاننا مدلول كلمة فضاء، وهذه كارثة لأننا أصبحنا لا نفهم حقاً ما يحدث. إذ لم يعد على الأرجح لمفهوم الفضاء نفسه معنى أنه مصنوع من نقاط.

**ولكن ألا يوجد طريقة نستطيع أن نرى بها شيئاً نقطياً يتحرك في حيِّز زمكاني من هذا القبيل؟**

إن الوتر شيء قصير لدرجة لا تُصدق. فطوله يساوي وسطياً طول بلانك، أي أصغر من قطر البروتون بمئة مليار مليار مرة. وعلى هذا فإن كونه ذا طول أمرٌ غير ذي شأن عملي من عدة وجوه. فأنت لن تشعر بأنك كنت أمام وتر ذي امتداد، ما لم تكن قد فحصته بعناية لا تصدق.

**تعني أنه يتصرف كجسيم نقطي، إلا ضمن مسافات بالغة الصغر وطاقات بالغة العظم؟**

نعم . وهذه مسافات لا أمل لنا البتة في أن نستطيع قياسها مباشرة في المختبر بأية طريقة . لكن هذه المسافات هي بالضبط المسافات التي تنطرح ضمنها كل مسائل الثقالة الكمومية ، وهي أيضاً المسافات التي تبدأ عندها النظرية الوترية تختلف جذرياً عن نظرية أينشتاين ، والواقع عن كل ما سبقها من نظريات .

**هل نحصل على صورة خاطئة إذا افترضنا أن الوتر الصغير ، الذي قد يكون مغلقاً بشكل حلقة ، يظهر على شكل جسيم لمن ينظر إليه من مكان غير قريب ، وأنه يبدو لمن يستطيع رؤية تفاصيله عن كثب قريب جداً منهمكاً بحركة تموُّجية ، وأن تلك الحركة التموجية هي التي تغير سلوكه في الطاقة العالية ؟**

إن هذه الصورة لا تخلو من معنى يمكن اعتماده ، وهي في الواقع الصورة التي يتخيلها أكثرنا للنظرية الوترية في الوقت الحاضر . أما في حقيقة الأمر فالنظرية أعمق من ذلك بكثير على الأرجح ، لأن من ينظر إلى الوتر عن كثب قريب يمكّنه من رؤية التموجات ، إن صح هذا القول ، يدخل عالماً يجد فيه بنية للمكان والزمان تختلف عن المألوف . وعلى هذا قد لا يكون صحيحاً حتى أن نتصور ذلك الشيء متحركاً عبر ما نعتقده عادة مكاناً وزماناً متواصلين .

**الأوتار متموجة بالفعل على أرضية زمكانية متبدلة ؟**

إنك لا تستطيع في نظرية ثقالية أن تفصل بنية المكان والزمان عن الجسيمات المشاركة لقوة الثقالة ؛ وبما أننا توسعنا اليوم في معنى الثقالة بما يجعل نظرية أينشتاين الثقالية مجرد قطعة صغيرة من تلك النظرية ، أصبح علينا أن نتوسع في معنى المكان والزمان .

**هل تريد أن تقول إن المكان والزمان مؤسسان ، بمعنى ما ، على أوتار ، بدلاً من القول بأن الأوتار تسكن المكان والزمان ؟**

نعم . إن فكرة الوتر لا تنفصل عن المكان والزمان اللذين يتحرك فيهما ، فإذا غيرتَ رأيك جذرياً في الجسيم المسؤول عن الثقالة بحيث يصبح ذا شكل وتري ، ستجد نفسك مضطراً إلى هجر أفكارك المعتادة عند سوية معينة من بنية المكان والزمان . وبالسوية المعينة أقصد تلك السلالم القصيرة جداً التي تتعامل مع مسافات من رتبة مسافة بلانك .

**دعني أتأكد إذا كنت قد فهمت ذلك بشكل صحيح . نستطيع في كل المناسبات تقريباً أن ننسى كل شيء عن الأرضية الزمكانية وبنيتها الضبابية في السلّم الصغير ، وأن نعتنق جسيمات تسكن حيزاً مكانياً وزمانياً عادياً كما نعرفه . أما إذا نظرنا عن كثب ، إلى سوية التفاصيل**

**الأنعم، فإن الأوتار تبدأ بالظهور ويصبح المكان والزمان والأوتار محبوكة معاً بأسلوب رهيف جداً.**

هذا صحيح. إنها طريقة رهيفة لم يفهمها أحد حقاً حتى الآن. وعلى هذه الناحية تنصبُّ بعض البحوث في محاولة فهم دقيق لكيفية حدوث ذلك.

**في عام ١٩٨٤ لم يكن للنظريات الوترية الهامة معنى إلا إذا كان الزمكان ذا عشرة أبعاد. كيف يجب أن نتصور العلاقة بين الزمكان ذي الأبعاد العشرة وبين المكان والزمان كما نحس بهما، واللذين عدد أبعادهما الكلي أربعة فقط؟**

واضح أن الأبعاد الإضافية لا بدّ أن تكون مختلفة نوعاً ما، وإلا كنا شعرنا بها. ومما لا بدّ أن نتعوده هو فكرة أن كل نظرية تحوي الثقالة هي نظرية تحدد بذاتها بنية الفضاء ويجب أن نتعود فكرة أن الفضاء يمكن أن ينحني، وأن الأبعاد يمكن أن تلتف على نفسها وتصبح، بمعنى ما، صغيرة جداً.

إنها فكرة تصعب على الإدراك، لكنك تستطيع، بكثير من التساهل، أن تعتمد على تشبيه بسيط تفوتك فيه رؤية أحد الأبعاد. خذ مثلاً خرطوم رش الماء. إن هذا الخرطوم سطح ذو بعدين؛ إنه شيء طويل له بعد دائري واحد. فإذا أنت لم تنظر إليه عن كثب قريب قد تظن أنه شيء وحيد البعد، مجرد خط لا غير. لكنك إذا رأيته عن كثب تدرك أن له بعداً آخر صغيراً جداً — إن الخرطوم في الواقع أنبوب ضيق.

وبتعميم هذا التشابه يمكن أن يوجد عدة أبعاد إضافية ملتفة على نفسها بشدة تجعلك لا تلحظها إلا إذا استطعت، بطريقة ما، أن تفحصها بمقدرةٍ فاصلة عالية جداً.

**هذا يعني أن كل نقطة من الفضاء، أو ما نظنه نقطة في الفضاء، هي في حقيقتها شيء ذو أبعاد إضافية ملتفة على نفسها.**

صحيح.

**قد يبدو أمراً عجيباً أن تنطلق من نظرية ذات عشرة أبعاد فتصل إلى أربعة، وتلتف ستة على نفسها؟ لماذا ستة؟**

صحيح أننا لا نفهم ذلك حق الفهم في الوقت الحاضر. وأعتقد أننا لم نبدأ إلا مؤخراً بتحري طلائع خفايا هذا الأمر على صعيد الفهم الرياضي لهذه النظريات. فقد شعرنا، من خلال سلسلة أحداث حصلت كلها تقريباً بالمصادفة، أن هذه النظريات ذات صفات خاصة جداً، وذلك بإجراء حسابات تكاد تكون متواضعة والحصول على مؤشرات تكاد تكون رائعة. لكن البنية

الكاملة للنظرية لم تُفهم بعد، وهذه مسألة من النوع الذي لا أعتقد أننا نستطيع إعطاء جواب شاف عنه إلى أن نتمكن من إعادة صوغ النظرية بطريقة تجعلها أكثر اكتمالاً على صعيد الرياضيات. فقد حدثت مثلاً تطويرات أعطت تشكيلة من النظريات الوترية الفائقة تعمل مباشرة في أبعاد الزمكان الأربعة ــ أي أن الأبعاد الإضافية التفت على نفسها بشكل يمكن أن نقول إنه آلي.

**على فرض أنكم ستتوصلون ذات يوم إلى فهم سبب هذا العدد، ستة أبعاد إضافية، فهل تعتقد أنكم ستكونون قادرين على معرفة كيفية التفافها على نفسها؟ ذلك أن هناك عدة طرق لانطواء الأبعاد الستة على نفسها، عدة توبولوجيات متباينة.**

أعتقد شخصياً أننا سنفعل؛ لكن هناك في الحقيقة جدلاً حول ما إذا كنا قادرين **مستقبلاً** على فهم هذا النوع من الأشياء. لكن من المقبول منطقياً أن توجد عدة طرق ممكنة لانطواء الأبعاد على نفسها وأن يكون قد حدث بمحض المصادفة أننا نعيش في عالم انطوت فيه على نفسها تلك الأبعاد الإضافية بهذا الشكل الخاص.

**هل يعني ذلك أن الظروف لا تكون مواتية لنشوء الحياة إذا حدث الانطواء بطريقة غير التي حدثت فعلاً.**

هذا منطق ممكن، لكنني لا أجد ما يغريني باعتناقه.

**هل لدينا مشكلة في أن بنية المكان والزمان أصبحت، كما ذكرتَ منذ قليل، شيئاً مرغياً مزبداً مما يشتهيه المرء في سلّم المسافات البالغة الصغر جداً، ومع ذلك تَسْعَون إلى صوغ النظرية الوترية قدر الامكان في وعاء من المكان والزمان المعهودين؟**

نعم. واضح أن هذا الأسلوب ليس الطريقة الصحيحة تماماً في تدبير الأمور. فهو لا يمكن، في أحسن الأحوال، أن يكون سوى نوع من الاقتراب من العالم الحقيقي، لكنه أفضل ما فعلناه حتى الآن. وعلى كل حال فإن ما رأيناه، حتى في تلك السوية، هو أن النظرية لا تكتسب معنى إلا من أجل صنف محدد جداً من التناظرات فيها، وهذا الآن مهم جداً. فذلك الصنف المحدد ذو أهمية خاصة لأن واحداً على الأقل من التناظرات النظرية الممكنة ذو شبه مذهل بأنواع التناظر التي اقتُرحت قبل ذلك على أسس تجريبية بحتة كتناظرات متاحة في توصيف الجسيمات التي تظهر في التجارب.

أعتقد أن من الصحيح القول بأن قسطاً كبيراً من الحماس للنظرية الوترية الفائقة ناجم عن أن أحد أنواع النظريات، نظرية $E_8 \times E_8$، تستدعي ما يسمى زمراً متميزة. وهذه تناظرات

رياضية متخصصة جداً وتؤدي دوراً خاصاً في الرياضيات ، ولهذا السبب يُتوقع منها أن تؤدي دوراً خاصاً جداً في الفيزياء . وعلى هذا لدينا الآن أخيراً في النظرية الوترية الفائقة سبب نظري يبرر لنا ظهورها في الفيزياء . وهذا في رأيي مبعث الحماس لدى عدد لا بأس به من الفيزيائيين النظريين .

**هل تقول إن الطبيعة أحكمت اختيار قطعة متميزة من الرياضيات ، تسمونها زمرة متميزة ، وأنها تستخدمها بطريقة معيَّنة ؟**

هذا صحيح ، وأظن أنها جذابة جداً للفيزيائيين النظريين . لكن الطريقة التي يُفترض أن تتبعها هذه النظريات للاتصال بالفيزياء تنطوي على حسابات صعبة نوعاً ما في الوقت الحاضر ، لأن أنواع الحسابات التي يسهل إجراؤها هي حسابات أشياء يمكن قياسها إذا توفرت فقط إمكانية تحري مسافات مكانية على درجة من الصغر لا تصدق ، أي طاقات عالية جداً ، ونحن عاجزون اليوم عن فعل ذلك في المختبر . وعلى هذا لا يبقى للمرء سوى أن يحاول الاستقراء مما يحدث في فيزياء المسافات الصغيرة جداً ، وأن يبحث عما تتنبأ به في مسافات من هذا القبيل يمكن قياسها في مختبرات المسرعات الجسيمية على سطح الأرض . وهذا النوع من الاستقراء شيء يصعب إنجازه .

لكن ما تم فعله حتى الآن شيء محير جداً ومثير للحماس لأن فيه كل أنواع القيود والحدود النظرية القاسية جداً بخصوص ما **يمكن** أن يحصل . ومثال ذلك أننا ، برغم عجزنا عن إثبات التفاف الأبعاد الإضافية على نفسها وإثبات صغرها البالغ ، إذا **افترضنا** أن معادلات النظرية سوف تتنبأ بأنها ملتفة على نفسها فعلاً ، عندئذ يمكن أن نحصل فوراً على كل ما نريد من قبيل النبوءات . ومما يثير الاستغراب الشديد هو أننا **إذا** افترضنا أن الأبعاد الإضافية ــ تلك التي لا نريدها ــ صغيرة جداً بالفعل ، عندئذ يكون هناك طريق يمكن أن نسلكه كي نتنبأ بالنظرية عن أنواع التناظرات التي تُلحظ مباشرة في مختبرات العمل التجريبي .

**لقد ذكرتَ أن تطورات حديثة فتحت الباب واسعاً أمام إمكانية تطوير نظريات وترية لا تعمل في عشرة أبعاد فحسب ، بل الآن في أبعاد أخرى .**

في عام ١٩٨٤ كان لدينا تحديد شبه وحيد لما يجب أن تتمتع به النظرية من صفات إذا افترضنا أن للزمكان عشرة أبعاد . وفي تلك الظروف كان لدينا الخيار بين نظريتين ممكنتين : إحداهما بالتناظر SO(32) والأخرى بـ $E_8 \times E_8$ كتناظرين متاحين للجسيمات . إن هذه الأبعاد العشرة ليست بالطبع أبعاد الزمكان الذي نعيش فيه ، لكن الفيزيائيين أدركوا بسرعة أن من شأن الأبعاد الستة الإضافية ، إذا كانت ملتفة على نفسها وصغيرة جداً ، أن تتيح تماماً لتلك النظريات المتغايرة إفراز

فيزياء محسوسة في أربعة أبعاد زمكانية. وكان واضحاً، حتى في تلك المرحلة، أن ذلك يمكن ان يحدث بعدة طرائق متباينة. كان هناك إذن نظرية للانطلاق شبه وحيدة لكنها كان لها عدة حلول مختلفة يمكن أن تعمل في أبعاد الزمكان الأربعة، ولم نكن نعرف كيف نختار من بين تلك الحلول الحل الصحيح، حتى برغم أننا ربما كنا نملك ما يحدد لنا بشكل وحيد، أو شبه وحيد، النظرية التي ننطلق منها.

واليوم اكتشف الباحثون طرائق لصنع أنواع جديدة من الحلول التي تعمل مباشرة في أربعة أبعاد. أي أنهم، بتعبير آخر، لن يحتاجوا البتة إلى المرور بمرحلة الأبعاد العشرة. إنها هي النسخ التي تكلمت عنها قبل قليل، ومن الخطأ الظن بأنها نظريات مختلفة فيما بينها. إذ يمكن اعتبارها أنواعاً مختلفة من الحلول لنظرية واحدة بمقدار ما يمكن اعتبارها حلولاً في عشرة أبعاد. وهكذا صرنا في موقف من يملك تشكيلة واسعة جداً من الحلول لنظريات قليلة العدد.

إن في الفيزياء الشائعة موقفاً يشبه ذلك. تصور أن ترى عيِّنات من الجليد والماء والبخار. فقد تحتاج إلى مدة كي يتأكد لك أنها في حقيقة الأمر حالات طورية متباينة لمادة واحدة ومن أن قوانين الفيزياء التي تحكم الخواص المجهرية لهذه الحالات واحدة. فالظروف هي التي تختلف من حالة لأخرى، ظروف رؤيتك للمادة الواحدة، وهي التي تميز ما بين حالات الماء الطورية الثلاث.

تلك هي الحال تقريباً في نظرية الوتر الفائق. فهي تنطوي على عدد كبير جداً من الحالات الطورية المتباينة تقابل الحلول المبتاينة للنظرية، وما زال علينا أن نميز البنية التحتية. وهذا في الواقع هو الهدف الرئيسي لكثير من الأعمال الحديثة؛ إنها تحاول العثور على أساس أمتن للنظرة الوترية الفائقة وبما يتيح أن نملك مجموعة من المعادلات حلولها التقريبية هي تلك «النظريات» العديدة المتباينة التي بحوزتنا اليوم. ولنا الأمل في أن نستطيع عندئذ تعيين الحل الذي يتفق مع نتائج الفيزياء التجريبية، إن كان ثمة حل.

**شيء واحد يحيِّرني قليلاً بخصوص صياغة النظرية مباشرة في أربعة أبعاد. فقد كنت أظن أن التخلص من الشذوذات لا يتم إلا إذا صيغت في عشرة أبعاد.**

حسن. إن هذه النظريات كلها، كما قلت لك، حالات طورية متباينة لنظرية أساسية واحدة. والتخلص من الشذوذات ممكن فيها كلها. وفي هذه الصورة، حيث تصاغ النظرية بأسلوب تقريبات متوالية متزايدة الجودة، يتخيل المرء جسيمات ذات شكل وتري تتحرك في مكان وزمان لا يختلفان كثيراً عن المكان والزمان المعروفين من قبل. لكن النظرية الوترية في حقيقتها أعمق من ذلك بكثير. إنها، كما شرحت منذ قليل، تدعو حقاً إلى تغيير ما نفهمه من كلمتي مكان

وزمان ، كما تدعو إلى تغيير مفهوم الجسيم . وذلك الجانب من النظرية الوترية ، الجانب العميق حقاً والذي يقضي بأن الزمكان الذي يتحرك فيه الجسيم يتغير هو نفسه أيضاً من جراء وجود الجسيم فيه ، ليس موجوداً في أحشاء الصيغة الحالية للنظرية الوترية . والذي نحتاجه بحق هو فكرة أساسية جديدة نضعها كمبدأ في صيغة النظرية الوترية . عندئذ يحق للمرء طبعاً أن يعتبر أن التقريبات التي نستخدمها تأتي من هذه الصعوبة الأكثر أساسية ؛ لكنه في الوقت نفسه قد يفهم ، عند تلك النقطة ، الفروق بين شتى أنواع الحالات الطورية ، أي بين شتى حلول النظرية . ربما نكتسب عندئذ حظاً أوفر في التنبؤ بطبائع الفيزياء كما تظهر في التجارب المخبرية .

**هل يوجد ، في النظريات ذات الأبعاد الأربعة ، مايشير إلى أن الأبعاد الستة لنظرية الأبعاد العشرة ماتزال موجودة ولكن بشكل آخر ؟**

إن الموقف أعمق من ذلك بكثير . فواقع الأمر أن النظريات الوترية لا يوجد فيها أربعة أبعاد أو عشرة . إنه قول تقريبي . أما في الصيغة الأعمق للنظرية فإن المقصود بفكرة البعد في الزمكان يجب أن يتغير . فمفهوم الزمكان العادي عندنا يتمثل بمجموعة سلسلة من النقاط . فكل موقع في المكان والزمان يتعين بنقطة . وعلى المرء أن يصوغ النظرية الوترية في فضاء أشمل بكثير — شيء كفضاء كل المواقع المتاحة للوتر . والواقع أن ذلك فضاء لا نهائي الشمول ، مما يجعل الكلام عن نظرية تعمل في عشرة أبعاد أو أربعة كلاماً تقريبياً في واقع بنية عدد أبعادها لا نهائي . وفي مضمار هذه البنية الأشمل يضعف كثيراً شأن التمييز بين صيغة النظرية في أربعة أبعاد وصيغتها في عشرة أبعاد . وسبب استخدام لغة الأبعاد العشرة أو الأبعاد الأربعة يعود إلى أننا اضطررنا حتى الآن إلى الحديث عن النظريات الوترية بطريقة تقريبية ، وفي هذه الطريقة وحدها يمكن إعطاء معنى لمجمل فكرة عدد محدود صغير من الأبعاد .

**هل زالت الآن فكرة الأبعاد الإضافية الملتفة على نفسها وزال معها الاهتمام بكيفية هذا الالتفاف ؟**

قطعاً لا . صحيح أن بعض جوانب هذا الموضوع صارت أقل إلحاحاً من سواها ، لكنها ما تزال موجودة كلها . لقد أصبحت ، في الواقع وبمعنى ما ، جزءاً من تلك البنية الأشمل بكثير . وأصبح الكلام عن أربعة أبعاد أو ستة ، برمته وبحد ذاته ، لا يعدو حديثاً تقريبياً عن ذلك الفضاء المتليّف stringy الأشمل بكثير ، الذي يحوي عدداً لا نهائياً من الأبعاد .

**ما تزال إذن هناك حاجة للعثور على كيفية التفاف الأبعاد الإضافية على نفسها ومع ذلك الفضاء المتليّف ؟**

إن وجود ستة أبعاد إضافية، أو أكثر أو أقل، في لغة الأوتار أمر قليل الأهمية ما دمنا أمام عدد لا نهائي من الأبعاد. فمجال الحديث عن الأبعاد الملتفة قد اتسع الآن كثيراً ليشتمل على محاولة فهم معنى الزمكان المتليِّف وإلى أي مدى تتخذ الفيزياء التي نعرفها شكل عملية اقتراب من هذه البنية الأغنى بكثير.

**هل تعتقد أننا سنتوصل ذات يوم إلى التعامل مع ما نسميه فضاءً متليِّفاً؟**

إن ذلك سيصبح على الأرجح أمراً ذا بساطة مدهشة بمجرد أن نفهم الصيغة الأساسية الصحيحة للنظرية فهماً حقيقياً. وهذا شيء معهود في الفيزياء. فعندما نكتشف بنية جديدة محيرة تبدو الأمور في البدء معقدة جداً؛ لكن الصورة تصبح أوضح وأبسط بعد أن تُفهم البنية فهماً حقيقياً. صحيح أنني لا أعلم الآن ما سيكون شكل الصيغة الجديدة، لكن من المأمول بالتأكيد أنها ستكون شيئاً بسيطاً. وسواء كان التعامل معها بالوسائل المحسوسة الشائعة ممكناً أم غير ممكن، أو كانت لا تبدو بسيطة إلا للمتمرس بالرياضيات المعقدة، فتلك مسألة لا أعلم جوابها الآن أيضاً.

**لنعد الآن إلى المكانة العلمية للنظرية الوترية. إن موقف فاينمان من النظرية الوترية الفائقة سلبي تماماً لأنها، حسب قوله، أخفقت في الاتصال مع المعطيات التجريبية، ككتل شتى الجسيمات العنصرية (الأولية) وشدات ثوابت الاقتران. فماذا تقول في ذلك؟**

ما كنت لأتوقع أن تكون تلك الطريقةَ المفضلة لدى فاينمان في معاملة الفيزياء. وأعتقد أن من العدل القول بأن النظرية بعيدة في الوقت الحاضر عن صنع نبوءات مفصلة جداً بخصوص القياسات النوعية في مجال الجسيمات العنصرية. وما زال العمل الشاق مستمراً في محاولة فهم النبوءات، ولا أشك في أننا سنفهم في النهاية أشياء أكثر.

لقد قلتُ قبل قليل إن الطريقة المتبعة حتى الآن في فهم النظرية تعتمد على التقريبات المتوالية؛ لكن هناك مسائل لا يمكن الإجابة عنها دون أن نذهب إلى أبعد من هذه الخطة التقريبية. فمسألة كتل الجسيمات التي نعرفها مثال على هذه المسائل. إن كتل الجسيمات كلها معدومة في سوية التقريب الحالية: كل الجسيمات عديمة الكتلة في هذا التقريب. وهذا الآن في الواقع تقريب جيد إذا علمت أن السلّم الذي نحاول فيه قياس هذه الكتل هو ما نسميه سلّم بلانك. وهذا يعادل $10^{19}$ كتلة بروتونية؛ أي إن كتلة أي شيء مما رأيناه في المختبر صغيرة جداً في هذا السلّم. فالقول بأن الكتل معدومة تقريب يبشر بالخير.

صحيح أن الجسيمات التي نعرفها فعلاً من حولنا ليست عديمة الكتلة؛ إن لها بعض

الوزن، وعلينا أن نكون قادرين على التنبؤ بكتلها. لكن هذا النوع من التنبؤ، أي بأن كتل الجسيمات غير معدومة، والتنبؤ بقيم تلك الكتل، ما زالا من الصعوبة بمكان في إطار الصيغة الحالية للنظرية الوترية.

هناك أيضاً أسئلة أخرى مهمة جداً مما لا نستطيع الإجابة عنه قبل أن نفهم النظرية بشكل أفضل. منها مثلاً كيفية توصيف الثقوب السوداء في هذه النظرية. فهي نظرية تحوي النسبية العامة، ولا بدّ لها إذن من أن تحوي ثقوباً سوداء. فكيف يمكن الحديث عنها بلغة الأوتار؟ وهناك مسألة أخرى تتصل بحال الكون في بداية نشأته. لقد أتى على هذا العالم في بداياته حين كانت سخونته فيه بالغة العظم، وكان للفيزياء الوترية أهمية كبيرة جداً آنئذ. ولمعرفة ما تقوله النظرية الوترية في تطور العالم المبكّر يجب علينا أيضاً أن نذهب في فهمنا إياها إلى أبعد من التقريب الذي استعملناه حتى الآن. لدينا إذن حتى الآن مسائل هامة لم نبلغ بعد في فهم النظرية شأواً يتيح لنا الإجابة عنها.

أما رأيي الخاص فما زال الوقت مبكراً، ويجب أن لا نحكم على نجاح النظرية بمقدار ما تستطيع أن تتنبأ به من تفاصيل الأشياء التي قسناها حتى الآن. ومن المؤكد أن هذا النوع الجديد تماماً من النظريات يمثل، إذا كان صحيحاً، تغيراً في بنية النظريات الفيزيائية التي تملك من الشمولية ما يكفي لاحتواء مضامين تخص أشياء لم نفكر بعد بقياسها حق التفكير. ولا بدّ من حصول أنواع جديدة من النبوءات المدهشة تماماً.

**هل تعتقد أن ذلك سيحدث؟**

بالتأكيد لا أعتقد أننا نعرف ذلك حتى الآن. فنحن غير قادرين بعد على استنتاج كل نبوءات النظرية؛ لكن لدينا بعض الأفكار، التي لا بدّ من الاعتراف بأنها جذابة حقاً من حيث قابلية قياسها، ونبوءات متينة للنظرية، لكنها من طبيعة مذهلة. خذ مثلاً تلك النبوءة بأن العالم يحوي على الأرجح نوعاً جديداً من المادة. وقد أُطلق عليه اسم المادة الظلّية shadow matter — مادة من غير المفروض أن نستطيع رؤيتها مباشرة، ولا نحس إلا بآثارها الثقالية فينا، برغم أن جسيمات المادة الظلية يمكن أن تتبادل فيما بينها قوى شديدة.

**ربما كانت المادة الظلية تحيط بنا من كل جانب، أليس كذلك؟**

ربما. وأنا لا أقول إنني أعتقد بأن النظرية تتنبأ بها، لكنها من النبوءات الممكنة بالتأكيد.

**هل تريد أن توحي بما يمكن أن يعني وجود نسختين من هذا العالم، تلك التي نسكنها وأخرى عالم ظلّي لا نراه إلا — ربما — من خلال مفعولاته الثقالية؟**

دَعْني أَقُلْ بحذر إن النظرية **يمكنها** أن تتنبأ بذلك . لكن هذا يتوقف ، سواء كانت تلك المادة الظلية موجودة أو لا ، على تفاصيل تاريخ العالم ، وهذا شيء من الصعب جداً حسابه على كل حال .

**إذا عَبَر نجم أو كوكب ظلي منظومتنا الشمسية ، فلابدّ أن نحس به .**

نعم .

**يوجد ، مع ذلك ، نوع من المخادعة في اختبار نظرية من خلال آثارها الثقالية فقط .**

صحيح . حتى لو كانت تلك المادة موجودة ، فليس ذلك مثالاً على نبوءة من السهل جداً اختبارها .

**هل تستطيع أن تعطي أمثلة أخرى على إحدى نبوءات النظرية الوترية الفائقة التي يمكن اختبارها تجريبياً بشكل أحسن ؟**

لا يوجد في الوقت الحاضر نبوءة مؤكدة نعرفها في هذا الشأن . لكن هناك نبوءة ذات صلة بواقع أن النظرية تنطوي على إمكانية وجود أبعاد إضافية ذات توبولوجية غريبة . وقد توجد أبعاد إضافية ذات فتحة في الوسط ، كالكعكة المدورة . عندئذ يمكن للجسم ذِي الشكل الوتري أن يؤسر في حركة دورانية حول الفتحة . ومثل هذه الأوتار المأسورة ذات خصائص غريبة . منها مثلاً أنها يمكن أن تولّد ما نستطيع أن نراه بشكل أنواع جسيمية جديدة يجب أن تكون ثقيلة جداً وأن تحمل شحنات كهربائية غير مألوفة ـــ كسرية ، أجزاء من شحنة الالكترون . وهي جسيمات أثقل من أن نستطيع انتاجها في المختبر ، لكنها ربما تكون قد تولدت في أثناء الانفجار الأعظم عندما كان العالم مفرط السخونة .

لا بدّ أن أُلح على أن ذلك تلميح طريف بعض الشيء إلى أنواع المفعولات التي يمكن أن توجد في النظرية الوترية مما يجعلها مختلفة جداً عن النظريات الشائعة في فيزياء الجسيمات . وعلى هذا ، وبالرغم من أن هذا النوع من التنبؤ يجب أن لا يُحمل الآن على محمل الجد أكثر من اللازم ، نستدل على وجود أمور تختلف فيها النظرية الوترية عن النظريات المتعارفة . فأيامنا هذه ما تزال مرحلة مبكرة وما نزال نأمل في العثور على مفعولات أخرى تمتاز بها أيضاً النظرية الوترية .

**كان شلدون غلاشو أيضاً متحفظاً جداً بخصوص النظريات الوترية . فقد قال بأنها قد تقوض الدافع لإجراء تجارب مخبرية وذلك من خلال إعطاء الانطباع بأن النظريين قد انتهوا من الموضوع . فما جوابك ؟**

إنني أتفق مع من يرى أن هذه النظريات بعيدة جداً في الوقت الحاضر عن أن تفسر مباشرة ما قيس تجريبياً في مخابر المسرعات. ونظراً لأنها تختلف جذرياً عن أنواع ما سبقها من نظريات، يجب عليها أن تتنبأ بنوع جديد تماماً من الظواهر التي لم نفكر حتى بقياسها. فأينشتاين لم يجد الظواهر التي يمكن اختبار النسبية العامة فيها إلا بعد أن صاغ تلك النظرية وعرف الظواهر التي يمكن قياسها. فدوران حضيض فلك الكوكب عطارد كان معروفاً من قبل، لكن تفسيره لم يحصل إلا بعد أن جاءت نظرية النسبية لتقول إن هذا الشذوذ في القياسات التجريبية ذو أهمية أساسية. والذي نحن بحاجة إليه في النظرية الوترية الفائقة هو ما يقابل الكوكب عطارد، أي نتيجة تجريبية متميزة واضحة معروفة سلفاً، لكن دون أن تجذب اهتمام أحد بها كنتيجة هامة لأن ما من أحد يدرك أنها ذات أهمية في اختبار نظرية أساسية.

**إن حجة غلاشو، كما أفهمها، هي أن النظريين الوتريين يتناولون الفيزياء بطريقة خاطئة في الأساس، أي إنهم يتبنون ما يُعرف أحياناً باسم طريقة من القمة إلى القاعدة؛ فينطلقون من صياغة عامة ثم يحاولون النزول منها نحو استخراج أوصاف العالم الواقعي. لكن غلاشو يفضل أن ينطلق من موجودات الفيزياء التجريبية وأن يبني على أساسها وبالتدريج نظرة علمية، وربما يعمل باتجاه نظرية عامة لكن انطلاقاً من فيزياء تجريبية. ألا تظن أن في هذا الأمر إزدواجية يجب أن تأخذها بعين الاعتبار؟**

حسن، أعتقد أن بالإمكان سلوك الطريقين. ويعلمنا التاريخ أن الفيزياء النظرية تقدمت بكلتا الطريقتين، ويمكنك أن تجد شواهد تاريخية عليهما معاً. وأنا موافق بالتأكيد على أن القوة الدافعة وراء ما يجرى من أبحاث في النظرية الوترية الفائقة كانت وما تزال البنية النظرية الأنيقة والأمل في حل ما أرى أنه المفارقة النظرية الأساسية الكبرى في فيزياء القرن العشرين، ألا وهي التعارض بين ميكانيك الكم والنسبية العامة. تلك كانت بالتأكيد دوافعي ودوافع أناس آخرين.

أعتقد أن من المهم أيضاً وجود أناس يعملون من القاعدة إلى الذروة. ويمكن للفريقين أن يتعايشا بكل سهولة، ومن المفروض أن يتعاونا.

**إذا نظرنا إلى الأيام الأولى من تاريخ النظرية الوترية، عندما لم يكن يهتم بها هذا العدد من الناس، هل شعرت في يوم من الأيام وكأن فيزيائيين آخرين ينبذونك حقاً بسبب انصرافك إلى هذا المجال من الفيزياء؟**

كلا، لا أظن أننا كنا منبوذين. أعتقد أننا عوملنا بتجاهل على نطاق واسع؛ وبعض السبب في ذلك يعود إلى أن النظرية الوترية مختلفة جداً، من حيث التقنية والأساس الفكري، عن أنواع

النظريات التي كانت «موضة» العصر. ومن المؤكد أن الأمر كان يتطلب، في أوائل الثمانينيات، جهداً كبيراً من أولئك الذين لم يكونوا قد عملوا في النظرية الوترية كي يتعلموا تقنياتها وكي يقرروا بأنفسهم ما إذا كانوا يعتقدون بها؛ كان همُّ هؤلاء الناس، إلا قلة منهم، أن لا يبذلوا الجهد المطلوب. كانت حياتهم في تلك الأيام هانئة، إن صح القول، لأن فيزياء الجسيمات موضوع يتبارى فيه الجميع، وكان من دواعي السرور أن تعمل في ميدان تسير فيه بالسرعة التي تريد دون أن تشعر بضغط من أحد.

كان للنظرية الوترية، كسواها، طورها المبكر في أوائل السبعينيات، وبمرور الزمن انطفأت في أواسط السبعينيات، ولم تكن بتاتاً موضوعاً ينبغي معالجته من وجهة نظر السمعة الشخصية. قد يكون هذا الكلام أكثر انطباقاً على الولايات المتحدة منه على بريطانيا، لكن من المؤكد أن الاتجاه السائد في فيزياء الجسيمات ــ نوع الفيزياء الذي يمارسه علْيَةُ القوم ــ لا يمر بالنظرية الوترية، وكان من الصعب في ذلك الوقت على المرء أن يجد عملاً إذا كان يشتغل بالنظرية الوترية. وأعتقد أن ذلك ناجم عن خلو الساحة آنذاك من أناس آخرين يعملون في هذا الموضوع.

**كيف بدأت التعاون فعلياً مع جون شوارتز ؟**

كان كل منا يعرف الآخر قبل ذلك بقليل، لكننا لم نعمل قط معاً قبل صيف ١٩٧٩ حين اتفق لنا كلينا أن نزور سيرن CERN في وقت واحد. إن سيرن مكان رائع للقاء وتبادل الأفكار، وكنا نتحدث عن التناظر الفائق والأوتار، وهما شيئان كنا كلانا مهتمين بهما، فتطورت علاقتنا إلى تعاون.

**إذا تطلعنا إلى المستقبل نذكر قول إدوارد ويتن بأن النظرية الوترية هي نظرية للقرن الواحد والعشرين ظهرت بالمصادفة في القرن العشرين، وهو يعتقد أنها ستسود الفيزياء خلال السنين الخمسين القادمة. هل تتفق معه في هذا الرأي؟**

إنني على يقين بأن التطورات المنطلقة من نظرية الأوتار الفائقة ستصبح التجارة الرائجة في الفيزياء الجسيمية النظرية لمدة طويلة. لكنني أُفضل في الواقع التعبير عن ذلك بطريقة أخرى. إنني لا أستطيع أن أتصور كيف يمكن لأي إنسان يعمل في النظرية الوترية بعد أن كان قد اشتغل في النسبية العامة، مثلاً، أن يعود للعمل في النسبية العامة دون أوتار. إن هذا يبدو شيئاً لا يمكن تصوره.

**هل ستصبح الأوتار الفائقة نظرية كل شيء؟**

دعني أقل فقط إن قلة ما نفهمه من أعماق بنية هذه النظرية يجعلني أعترض على هذه التسمية الشائعة، على القول بأنها نظرية كل شيء. فنحن لا نعلم شيئاً حتى الآن عما تتنبأ به النظرية، كما لا نعلم بعد الأسئلة التي يجب طرحها. ولدي شعور بأن فهم النظرية بطريقة أعمق جداً سيفرز نتائج وأسئلة لن يكون بإمكان النظرية أن تجيب عنها فوراً، وعلى هذا أرى أن القول بأنها نظرية كل شيء يعود إلى القول بأنها تبدو قادرة على الإجابة عن الأسئلة التي نعتقد الآن أنها مهمة في فيزياء الجسيمات.

**إنها نظرية تدّعي على الأقل بأنها تُعنى بإيجاد حل لمسألة الصلات بين كل الجسيمات وكل القوى، هل هذا صحيح؟**

نعم. إنها تُعنى بهذه المسألة، وواضح في الواقع أنها تعطي بعضاً من الملامح المهمة في شأن الجواب.

**إنها إذن تدمج معاً القوى والمادة التي صنع منها العالم والمكان والزمان اللذين يحويانها. إن هذا يبدو لي كل شيء!**

لكننا لا نعرف حتى الآن كيف نصوغ النظرية بطريقة تجعلها توحد الزمكان مع جسيمات ذات شكل وتري. ولا نعلم ما عند النظرية من قول بخصوص الفيزياء فيما بعد سلّم بلانك، ذلك المجال الذي يؤدي دوراً مهماً في أفكارنا الحالية.

**إذن قد يوجد مستوى أعمق حتى من ذلك؟**

قد نجد أنفسنا أمام مجموعة أمور جديدة كلها، ومجموعة أسئلة لا تستطيع النظرية الإجابة عنها. حتى أنني لا أعتقد أننا نعرف الأسئلة قبل أن نفهم النظرية بطريقة أكثر منطقية. فمن الممكن مثلاً أن يتطلب ذلك تغييراً جذرياً في أفكارنا عن ميكانيك الكُم. إن ذلك سيكون مثيراً جداً.

**ماذا بشأن السير في الاتجاه الآخر، لا إلى المستوى الأعمق، لكن نحو سلالم أوسع فأوسع حيث يكون المرء أمام منظومات متزايدة التعقيد؟ يمكن للمرء عندئذ أن يعترض على تسمية ذلك بنظرية كل شيء لأنها قد لا تفسر أصل الحياة مثلاً.**

هذا صحيح. هناك كل أنواع القضايا المعقدة التي يمكن أن تكون ضعيفة الصلة بفهم الفيزياء في المستوى المجهري.

**لكن هل توافق على القول بأن نظرية الأوتار الفائقة يمكن أن تمثل، في حال نجاحها، نقطة الأوج في جهود ألفين وخمسمئة عام من البحث عن اللبنات النهائية في بناء عالم الحقيقة، أي**

انتصار البرنامج الاختزالي ؟

إنني ، شخصياً ، لست من أنصار الرأي بوجود « لبنات بناء نهائية » . فأنا لا أعتقد بأنه لا يمكن لأحد أن يأتي ، بعد ملياري عام من الزمان ، بنظرية أفضل . بل إنني أعتقد جازماً بأنها نظرية جيدة للعصر الحاضر وبأنها ستدوم عدة سنوات . وبما أن النظريات الوترية ذات صلة بهذا العدد الكبير من فروع الرياضيات ، نستدل على أنها تحوي حقائق عميقة .

**إذن ، فالأوتار وُجدت لتبقى ؟**

مدة طويلة .

# 5

## ديفيد غروس

ديفيد غروس D.Gross أستاذ الفيزياء في جامعة برنستون . إنه من النظريين القادة في الجسيمات العنصرية وله إسهامات مهمة في الكروموديناميك الكمومي . وهو ، كواحد من المعروفين باسم رباعي برنستون الوتري ، أحد رواد ما يسمى بالنموذج الوتري المتغاير .

**إن إحدى السمات الغريبة في النظرية الوترية الفائقة هي أنها يجب أن تصاغ في أكثر من أربعة أبعاد زمكانية ، مما يعني وجود أبعاد فضائية لا نراها لسبب ما . هل لك أن تقول شيئاً عن هذا الموضوع ؟**

إن التفكير بإمكانية وجود أكثر من ثلاثة أبعاد فضائية قديم جداً ولا يقتصر على النظريات الوترية ــ رغم أن النظريات الوترية تختلف عن سواها في أنها يجب أن تصاغ في أكثر من ثلاثة أبعاد فضائية . كان ذلك يُعتبر في البدء سيئاً جداً ، أما الآن فقد أدركنا أن مهمة التجربة أن تكتشف عدد الأبعاد الفضائية الموجودة . فإذا كانت الأبعاد الاضافية ملتفة على نفسها في دوائر صغيرة (أو بشكل أعقد ) ، وكانت صغيرة بقدر كاف ، يكون من الطبيعي أن لا نعلم بوجودها من خلال دراسات عَرَضية .

**دعني أتأكد من أنني فهمت ذلك بشكل صحيح تماماً . هل تقول بأن ما نظنه عادة كائناً نقطياً في الفضاء العادي ذي الأبعاد الثلاثة هو ، في حقيقته ، صرة صغيرة من أبعاد إضافية ؟**

صحيح . إن القشة تُرى من بعيد بشكل خط ، لكنك إذا اقتربت منها كثيراً وكان عندك عينان سديدتان أو عدسة زجاجية مكبِّرة ، ترى أن لها بعداً إضافياً دائرياً . وعلى هذا المنوال يمكن لكل نقطة أن تمتلك أبعاداً إضافية في اتجاهات لم يسبق أن تحريناها . وفي النظرية الوترية نحتاج إلى ستة منها ؛ ولئن كان على النظرية أن تتفق مع واقع أننا لم نلحظها بعدُ فما ذلك إلا لأنها ملتفة وصغيرة

جداً. والحقيقة أن إمكانية كونها صغيرة شيء معقول لأن النظرية تنطوي على سلم أطوال طبيعي صغير، صغير جداً ($10^{-33}$ سنتيمتر). ومن المعقول حقاً أن الأبعاد الإضافية في نظرية من هذا القبيل ستلتف آلياً على نفسها ولا تقدم لنا سوى ثلاثة اتجاهات مكانية كبيرة ومنشورة.

**لنفترض أننا نملك الجهاز القادر على تحري هذه السوية الدقيقة جداً من التفاصيل وعلى رؤية تلك الأبعاد الإضافية، فكيف يكون شكلها؟**

حسن، كيف نفحصها عملياً؟ إن طريقة فحصنا هي أن نبني مسرعات ضخمة، وهذه المسرعات تسبر غور الفيزياء ضمن مسافات قصيرة جداً.

**هذا افتراض بحت؟**

نعم، مسرع افتراضي، مسرع يبلغ من عظم طاقته $10^{16}$ ضعفاً من أقدر مسرع نملكه اليوم، ويكلف $10^{20}$ ضعفاً مما نستطيع تأمينه. ذلك هو ما نحتاجه لسبر هذه الأبعاد الإضافية، لكن لن نكون أبداً، وبأية وسيلة، قادرين على رؤيتها كما نرى، مثلاً، تحت المجهر. ولو استطعنا تصور أننا نفعل ذلك لبدت لنا يميناً ويساراً وفوقاً ــ ستكون يميناً ويساراً وفوقاً في ستة اتجاهات أخرى فقط؛ باستثناء أن المرء يدور ويعود، في تلك الأبعاد الأخرى، إلى النقطة نفسها ــ ستكون دائرية ومغلقة في تلك الاتجاهات.

**هل يمكن أن يُستنتج من الحسابات كيف هو شكل هذا الفضاء الإضافي ذي الأبعاد الستة؟**

إن مسألة هندسة الفضاء والزمن أصبحت منذ أينشتاين قضية دينامية. ويجب دراستها في الفيزياء. وعلى هذا يجب تناول النظرية الوترية وحل المعادلات الوترية. والحل الذي تقدمه النظرية، وهي نظرية في بنية الزمكان، سيحدد هندسة المكان والزمان فيها.

لكن ما جرى حتى اليوم، في إطار النظرية الوترية المتغايرة، هو تحري الحلول الممكنة التقليدية (أقصد غير الكمومية). فتؤخذ النظرية ويستنتج منها، بشكل غير مباشر نوعاً ما، الحلول الممكنة لمعادلات حركة النظرية. وقد وجدنا، للنظرية المتغايرة، صنفاً كاملاً من الحلول الممكنة، ملايين وملايين من الحلول الممكنة في الواقع. وبعضها يصف عالماً يشبه في هندسته عالمنا. في هذا العالم ثلاثة أبعاد مكانية وواحد زمني وستة أبعاد صغيرة تلتف متراصة بشكل طيات متعددة manifolds، أو سطوح، رياضية غير مألوفة ذات خصائص يستمتع بها الرياضيون وعلى الفيزيائيين أن يستوعبوها. وعند هذه المرحلة علمنا أن النظرية الوترية المتغايرة ذات حلول منطقية تشبه عالمنا في هندستها. ولها أيضاً حلول منطقية لا تشبه عالمنا ذات أكثر من ثلاثة

**أبعاد منشورة، ولا نعرف حتى الآن المبادئ الفيزيائية لانتخاب الحلول ذات الأبعاد الأربعة من تلك التي لها عشرة أبعاد أو ستة أو ثمانية.**

**هل يوجد عدة حلول ذات ثلاثة أبعاد مكانية؟**

نعم، يوجد منها ملايين وملايين. يوجد غزارة هائلة بالحلول التقليدية الممكنة. وهذه الحلول ليست مقبولة على الصعيد التقليدي فحسب، بل تبدو مقبولة أيضاً على صعيد ميكانيك الكم. وعندما تُفحص التصحيحات التي يستدعيها ميكانيك الكم، والتي ربما قادت إلى نتائج سخيفة أو مزعزعة، يتبين أن هذا لا يحدث في جميع رتب التقريب (حيث يُفترض أن الحل التقليدي صحيح وأن المطلوب لا يعدو تصحيحات كمومية طفيفة).

إن هذه الغزارة كانت في البدء سارَّة جداً لأنها تدل على أن النظرية التي من النوع المتغاير يمكن أن تشبه عالمنا إلى حد كبير. فهذه الحلول، بالاضافة إلى احتوائها على زمكان ذي أربعة أبعاد، تنطوي على خصائص أخرى تشبه عالمنا ـــ أنواع الجسيمات المناسبة، كالكواركات واللبتونات، وأنواع القوى المناسبة. وهذه الخصائص تخرج من النظرية بشكل طبيعي أو، على الأقل، يمكن أن تخرج منها بشكل طبيعي. وكان ذلك مصدر حماس كبير ظهر منذ سنتين.

بيد أن من المربك قليلاً أن نملك هذا العدد الكبير من الحلول وأن لا نملك وسيلة جيدة لانتخاب الجيد منها. ومن المربك أكثر أن لهذه الحلول، بالإضافة إلى ما تحويه من خصائص مرغوبة، بضع خصائص تنذر بعواقب وخيمة؛ منها احتواء النظرية على تناظرات لا تظهر في عالم الواقع، مما يوجب عليها أن تنكسر بشكل ما. عندئذ يوجد جسيمات عديمة الكتلة لم تُشاهد قط، مما ينفيه الواقع التجريبي. وعلى هذا يوجد شيء خاطئ في هذا الحشد من الحلول المحصول عليها حتى الآن. ولنا وطيد الأمل في أن تلقى هذه المسائل حلولاً في المفعولات الدينامية التي لم تظهر في هذا التناول الاضطرابي، وأن يتاح انتخاب حل واحد ووحيد من حلول النظرية، تلك الحلول التي تبدو حتى الآن متساوية في الجودة.

**دعني أتأكد إن كنت قد فهمتُ ذلك فهماً صحيحاً. إن التعامل مع النظرية يحدث اليوم ضمن مخطط تقريبي ـــ اضطرابي ـــ على اعتبار أنها سلسلة تصحيحات صغيرة، وأن كل هذه الحلول التقريبية تبدو غير مرضية بشكل ما. ليس فقط بسبب وجود عدد كبير جداً منها، بل أيضاً لأن أياً منها لا يتمتع بسمات مرضية تماماً. لكنك توحي بأنه إذا أمكن تدبير الرياضيات بحيث تعطي حلاً صحيحاً، عندئذ يزول هذا الغموض؟**

صحيح. وتلك حال عدة نظريات أخرى نعرفها، كنظرية الكروموديناميك الكمومي، مثلاً، التي

هي نظرية كواركات وغليونات تصف القوة النووية وبنية النواة. وخواص الهَدْرونات (جسيمات نووية) لا يمكن الحصول عليها إلا بآلية غير اضطرابية معقدة جداً. لكن تناول هذه النظرية بالطريقة الاضطرابية، كما نفعل في النظرية الوترية، يقود إلى نتائج غير معقولة.

إننا لا نحسن استخدام النظرية الوترية حتى الآن إلا بالطريقة الاضطرابية. ونحن لم نفهم بعدُ النظرية فهمـاً مناسبـاً، أو حتى أننا لا نملك لها صيغة تتيح معالجة المسائل غير الاضطرابية. لكن من المستبعد جداً، ولأسباب متنوعة، أن تكون النظرية الاضطرابية كافية.

**ما أسباب ذلك؟**

أولاً، إذا كانت النظرية صحيحة، فليس من المستحسن أن تكون كافية لأن المعالجة الاضطرابية تخالف التجربة!

ثانيـاً أن النظرية الوترية **تحوي** عدة نظريات نحن مطلعـون عليها، كالكرومودينامـيك الكمومي، ومعروف أن نظرية الاضطراب لا تكفي من أجلها.

ثالثـاً أنها نظرية غير ذات وسطاء اختيارية، أي دون ثوابت قابلة للتدبير. فإذا وجدت حلاً للنظرية فإنك لن تستطيع أن تعزف عليه. لأنه واحد مفرد. كل شيء فيه محسوب. ومن المستبعد جداً في مثل هذه النظرية أن تستطيع الحصول على سلسلة اضطرابات ــ ما المقدار الذي يمكنك أن تتوسع فيه؟ فأنت عادة تستطيع أن تتوسع في أمر ما عندما يكون لديك ثابت صغير تستطيع أن تتدبره، لكن لا يوجد هنا ثابت صغير متاح لك تدبيره. بل إن كل شيء في النظرية قابل لأن يُحسب.

رابعـاً، إذا قُدِّر لك أن تأتي بنظرية من هذا النوع يبدو أنها تحوي الفيزياء كلها، فإن عليها أن تتعامل مع مسائل أساسية جداً في الفيزياء، ولاسيما مسألة الثابتة الكونية.

**حدثنا عن ذلك.**

إنها قضية طاقة العالم الأصلية. ففي النظريات العادية حول المادة تُهمل الثقالة، والسلَّم المطلق للطاقة ليس مهمـاً. وهذا ليس مقلقـاً. لأن الاهتمام ينصب على الفروق الطاقية؛ ولا توجد طريقة لقياس السلَّم المطلق للطاقة. ونقول عادة إن الثقالة مقرونة بالكتلة؛ لكن الكتلة طاقة، كما نعلم من أينشتاين. فالثقالة مقرونة بالطاقة وهي، بمعنى ما، «تَعْرِف» المقدار الذي يحويه جسم ما من الطاقة ــ وهذا ينطبق أيضـاً على العالم الكوني ككل. فللعالَم نفسه كثافة طاقية.

**حتى عندما يكون الفضاء خلاءً؟**

حتى في الفضاء الخالي . وتستطيع أن تقيس الكثافة الطاقية للفضاء الخالي لأنها كلما كانت كبيرة اشتد انطواء العالم على نفسه بفعل قوة التجاذب الثقالية . وعلى هذا فإن قياس البنية الإجمالية للعالم يتيح قياس الكثافة الطاقية الأصلية لهذا العالم ؛ وقد حدث هذا القياس ــ ليس بالضبط ، بل وُضعت حدود لها لأنها تبدو قريبة جداً من الصفر . وفي الواقع يبدو أنه أحسن تعيين تجريبي أنجزناه لكمية صفرية ! إنها صفر بدقة تساوي 10 ــ 120 ؛ وذلك بوحدات كتلة بلانك ــ السلّم الثقالي الطبيعي للنسبة كتلة/طاقة . وهذا يعني أنك إذا رُحْت تعمل في أي من النظريات الفيزيائية الدارجة التي تحوي الثقالة وسألك أحد الناس ، في غياب أية عملية رصدية ، عن رأيك في قيمة الكثافة الطاقية الأصلية للعالم ، فإنها تساوي 12010 ضعفاً من الحد الذي رُصد فعلاً . والذي رصد فعلاً صغير في الحقيقة لدرجة أن كل الناس يعتقدون بأنه لا بدّ أن يكون معدوماً . لكن لا يوجد سبب لانعدامه ! بل هو ، كما قلت ، يجب أن يكون أكبر بكثير . وليس هذا فقط . فحتى لو تدبرته كي يكون صفراً في النظرية ، أي كي تنطوي النظرية على كثافة طاقية معدومة (وهذا شيء لا يحب الفيزيائيون إجراءه عندما يجب الذهاب في التدبير إلى المرتبة العشرية 120 ) ، ثم وجدت أنك نسيت مفعولاً كمومياً صغيراً ، عندئذ يكون ذلك مؤدياً ، بموجب ما نعلمه حتى الآن ، إلى توليد ثابتة كونية غير معدومة مرة أخرى . هذا وإن صغر الثابتة الكونية كان سراً منذ أدخلها أينشتاين أول مرة . ومنذ ذلك الوقت وُجد أن من الضروري أن توضع قيمتها مساوية صفراً ، صفراً ، صفراً ولم يفهم أحد السبب .

جيد حتى الآن ، ما دمنا لا ندَّعي أن لدينا نظرية كل شيء . أما إذا زعمت أنك تملك نظرية كل شيء فيجب عليها أن تحل هذه المسألة أيضاً ، لأن نظرية كل شيء ستعطي ، أو لا تعطي ، ثابتة كونية . فإذا لم تفعل ، وكانت مع ذلك قادرة على إنتاج ما نراه من حولنا في عالم الواقع ، فإن ذلك سيتطلب آلية فيزيائية لم ندركها حتى الآن ، وهي ليست بالتأكيد من قبيل ما نستطيع معالجته بنظرية الاضطراب .

إن الثابتة الكونية في النظرية الوترية ما تزال صفراً حتى الآن . وهذا يعني وجود حلول للنظرية المتغايرة تعطي أربعة أبعاد يمكن مشاهدتها ، وهي تشبه عالمنا هذا ؛ مما يعني عدم وجود ثابتة كونية . ولو كانت موجودة لما حصلنا على الأبعاد الكبيرة التي نستطيع التجوال فيها . أي أن الأبعاد الثلاثة المكانية كانت ستغدو ملتفة على نفسها بشكل كرية أصغر من الذرة . وهذا لا يحدث . وسبب عدم حدوثه يُفهم على أساس أنه ذو علاقة بالتناظر الفائق ــ أي أن هذه الأوتار الفائقة فائقة التناظر ــ وأن هذا التناظر هو الذي يحول دون نشوء الثابتة الكونية . وليس لدينا فكرة عن كيفية انكسار هذا التناظر (إنه يجب أن يكون مكسوراً لأنه مرئي في هذا العالم) ودون أن يعطي

ثابتة كونية . ذلك أن كل الآليات التي خطرت لنا حتى الآن بخصوص انكسار التناظر الفائق تقود إلى ثابتة كونية .

وهكذا يوجد شيء غريب جداً يحصل في العالم الفيزيائي ، مبدأ جديد أو أسلوب انكسار للتناظر الفائق من النوع الذي سيحل لنا المسألة بشكل ما ؛ وإذا قُدِّر للنظرية الوترية أن تفعل ذلك ، فعليها أن تفعله بآلية دينامية تختلف تماماً عما يحدث في نظرية الاضطراب .

**ألا تعتقد عندئذ أن حل المسألة الكونية سيُبنى بطريقة أساسية في النظرية الوترية ؟**

ممكن جداً أن يبنى بطريقة أساسية في النظرية الوترية . لكن لا يوجد برهان على ذلك لأن البرهان المقنع سيكون حلاً وحيداً . لكن الثابتة الكونية في النظرية معدومة حتى الآن حسب معلوماتنا . وفي الوقت نفسه ليس التناظر الفائق مكسوراً . فنحن نرى أن هذين الشيئين متصاحبان ويبدوان متلازمين . أحدهما جيد والآخر سيئ . ويداعبنا الأمل في أن تكسر النظرية التناظر الفائق دون أن تعطي ثابتة كونية غير معدومة . ولا يوجد برهان على أن ذلك سيحدث ، سوى الأمل في أن تصف النظرية العالم الواقعي . وإذا حدث يكون علينا أن نكتشف عملية دينامية جديدة ساحرة جداً ، أي آلية غير موصوفة بشكل مناسب في الطرائق الاضطرابية المعروفة حتى اليوم .

**ما هي عندئذ الطريقة نحو ذلك ، علماً أن المعالجة الاضطرابية طريقة مباشرة بعض الشيء وأنها أسهل رياضياً من المعالجة الدقيقة ؟ وهل عليكم ، بكل بساطة ،أن تتعلموا رياضيات جديدة ؟**

حسن ، ذلك هو الاتجاه الذي يسلكه معظم الناس حتى اليوم . وهناك جملة من الدوافع الفيزيائية بحسب ما نريده من النظرية . وبموجب ما علمناه حتى الآن في هذه الحلول الاضطرابية تمتلك النظرية معظم المقومات التي نحتاجها لتفسير ما نشاهده في الطاقات المنخفضة ، والأشياء التي نفتقدها هي بضعة أجوبة صعبة جداً عن بعض تلك المسائل الأساسية .

فإلى أين نحن ذاهبون إذن ؟ علينا ، في العادة وكما نفعل في فيزياء الجسيمات منذ عشر سنين ، أن ننتظر حتى يقدم لنا أصدقاؤنا التجريبيون مفتاحاً للحل . تلك هي الطريقة التي اتبعناها دوماً في الماضي . لكننا لم نعد نملك هذا الترف .

**المشكلة أنه لا يوجد ما يكفي من المال لبناء المسرِّعات الضخمة لفعل ذلك ؟**

لا يوجد ما يكفي من المال في خزائن دول العالم كلها مجتمعة . إنه مشروع خيالي حقاً ، ليس فقط لعدم كفاية المال ، بل أيضاً لأن من المتعذر التفكير بخطة عملية لبناء مسرعات من هذا القبيل . وقصارى أملنا أن نصبح قادرين على بناء مسرعات أضخم بعشر مرات من التي

نستخدمها اليوم بهدف دراسة بعض مجالات فيزياء طاقة الغد، لكن بلوغ كتلة بلانك شيء مستحيل المنال في المستقبل المنظور، إن كان ثمة أمل. وعلى هذا لن نجد مفتاحاً مباشراً قادماً من مجال الطاقات المناسبة؛ بل علينا أن نفتش عن مفاتيح غير مباشرة نستمدها من علم الكون أو من فيزياء الطاقة المنخفضة، ونحن مضطرون أكثر فأكثر إلى البحث عن أفكار رياضية لتحري تفرعات النظرية وعن بنى رياضية جديدة. صحيح أنها إجراءات تعتمد على الحظ ومحفوفة بالأخطار، ولكن لا حيلة لنا سوها.

إذا لم يكن غير الأسنة مركباً فما حيلة المضطر إلا ركوبها

**يمكن للشكاك طبعاً أن يرى في ذلك تكراراً لمناسبات تاريخية سابقة ظن فيها الفيزيائيون أنهم وضعوا كل شيء ضمن نظرية موحدة واحدة، ثم تبين خطأ هذا الظن. فهل هناك مايوحي بخطر أنكم تركضون وراء سراب خادع؟**

هناك دوماً خطر الركض وراء سراب خادع حتى ولو كنت تعمل على صلة بالتجربة. هذا الخطر موجود دوماً، وعلى هذا يجب أن تعمل جاهداً على اختبار أفكارك باستمرار كي لا تضيع قسطاً من وقتك في السير معصوب العينين. وينتاب بعضنا اليوم شعور بأن الأمر مختلف هذه المرة بعض الشيء؛ لكن هذا الشعور قد يكون خاطئاً بلا شك. فبنية هذه النظريات غنية لدرجة لا تُصدق وهي، بطرائق عديدة، تحوي ما نعرفه حتى الآن، أو أنها على الأقل تظهر قادرة على احتواء فيزياء الطاقة المنخفضة كما نعرفها، وهذا من بعض النواحي لم يكن صحيحاً حقاً في النظريات الكبيرة قبل الآن. لكن هذا قد يكون وهماً، وربما كان في الأمر شيء أغرب حتى من الأوتار الفائقة والأبعاد العشرة، شيء ضروري لتفسير كل شيء. وما من طريقة للحسم دون تجريب، وهذا التجريب متواصل، وسيستمر أعواماً إلى أن يتبين خطؤه في الأساس أو أن يأتي إنسان بأفكار أحسن. والواقع أن الأفكار الأحسن تكون عادة أهم من دليل النقص، لأن الفيزيائيين يفوزون بشيء يعملون فيه! وفي هذه الحالة، إذا لم توجد فكرة منافسة أفضل حول هذا الموضوع فسيعملون في الأوتار.

**إن النظرية الوترية تبدو فعلاً ذات جاذبية في أوساط الفيزيائيين النظريين. وأعتقد أنني لم أشهد في خبرتي مثل هذا الحماس لنظرية ما. فهل هناك شيء مُرض جوهرياً، أو واعد جوهرياً، بخصوص استعمال الوتر كبنية أساسية لصوغ نظرية كل شيء؟**

هناك سببان يفسران لماذا اكتسبت النظرية الوترية مثل هذه الشعبية في السنتين الأخيرتين. أهمهما

عدم وجود أفكار جيدة أخرى في هذا الشأن ، ذلك هو ما جذب معظم الناس إليها . ولم يكونوا ، في بدء اهتمامهم بها ، يعرفون شيئاً عنها . والواقع أن رد الفعل لدى معظمهم كان أنها نظرية كريهة جداً لا تسر الخاطر ، هذا على الأقل قبل بضع سنين عندما كان فهم النظرية أقل نضجاً بكثير . فكان من الصعب عليهم أن يُلموا بها وأن يلتفتوا إليها . ولذلك أعتقد أن سبب انجذابهم إليها هو أنهم لم يجدوا لعبة سواها . فقد صارت إلى الفشل كل الطرائق الأخرى التي استهدفت بناء نظريات موحدة كبرى والتي كانت تقليدية لدرجة أنها لم تعد تغري بالانطلاق منها ولا تتقدم إلا بالتدريج المتباطئ ، في حين أن اللعبة الجديدة لم تفشل بعد . زد على ذلك ما تولد منذ البدء من إدراك لقدرتها الكامنة على فعل أشياء أكثر مما يمكن للطرائق الأخرى إنجازه .

أما السبب الثاني لجاذبية النظرية الوترية فهو أنها كلما ازدادت دراستها ونمت شجرتها ازداد عدد المقتنعين بجمالها . إنها نظرية جميلة جداً ولو أن فهمنا لها ما زال في بداياته ؛ ومن المحتمل أن يزداد جمالها في المستقبل عندما نفهمها فهماً أعمق . ولم يسبق لأفكار جديدة سواها أن أحرزت مثل هذه الشعبية في وقت قصير ، ومازال يشتد اقتناع الناس بعمق هذه النظرية وبنيتها .

**إنني أتحدث في برنستون ، موطن ألبرت أينشتاين . فماذا تظن أنه كان سيفعل بالنظرية الوترية الفائقة لو ظل حياً حتى الآن ؟**

حسن ، إن المرء يتساءل دائماً عما كان يمكن أن يكون رأي أينشتاين في أشياء عديدة . وقد طرحتُ على نفسي هذا السؤال عدة مرات بخصوص هذه الفكرة أو تلك . علينا طبعاً أن نجعل أينشتاين يغض النظر عن أنها نظرية ميكانيكية كمومية ، وأن نشرح له التناظر الفائق الذي هو نوع من الامتداد الرائع لأفكاره بخصوص المكان والزمان . أعتقد أنه كان سيحب التناظر الفائق ، ولا أستطيع أن أتصور أنه كان سيكرهه ؛ فهذا التناظر ليس بالضرورة من شؤون ميكانيك الكم . والواقع أن هذا التوسع في فكرة التناظرات الزمكانية هو ، من عدة وجوه ، تحقيق جزئي لأهداف أينشتاين . كان لأينشتاين أمنيتان . إحداهما ، وهي التي لم تكن على الأرجح في موضعها ، أن يبرز ميكانيك الكم آلياً من نظرية تصاغ في سوية تقليدية عالية وتكون قادرة ، بسبب ما يُفرض على معادلاتها من قيود صارمة ، على إفراز شروط كمومية . لكن ما من أحد يعتنق اليوم هذه الفكرة . بل نحن نعتقد أن ميكانيك الكم شيء حقيقي وأنه وُجد ليدوم .

لكن أينشتاين كان يعتقد أيضاً بأن الهندسة تتحكم في الديناميكية . وقد اعتاد إبداء الملاحظة التالية بخصوص معادلاته الحقلية الشهيرة . إن من شأن معادلات النسبية العامة ، من جهة يُسرى ، أن يوجد انحناء للفضاء الزمكاني وأن هذا الانحناء يكافئ ، من جهة يُمنى ، طاقة

واندفاع المادة التي هي مصدر انحناء المكان والزمان . وقد اعتاد على القول بأنه يحب الجهة اليسرى من معادلاته ــ إنها الوجه الجميل ، الوجه الهندسي ، وجه انحناء الفضاء . لكنه لم يحب الجهة اليمنى ، التي تتكلم عن هذه «المادة» التي عليك أن تدخلها كيف شئت . وعلى هذا كان يجب أن يقول إن الجانب الأيسر من معادلاته جميل وإن الجانب الأيمن قبيح . كانت معظم أعماله في سني نشاطه العلمي الأخيرة تنصب على محاولة التحرك من الجانب الأيمن إلى الجانب الأيسر وعلى فهم المادة على أساس أنها بنية هندسية . كان يحاول بناء المادة نفسها من الهندسة ــ وهذا ما تحاول أن تفعله النظرية الوترية . إذ يمكن أن نفكر بها بهذه الطريقة ، خصوصاً بنظرية كالوترية المتغايرة ذات الصلة الوثيقة بنظرية ثقالية تبرز منها جسيمات المادة كما تبرز قوى الطبيعة الأخرى بطريقة لا تختلف في شيء عن طريقة بروز الثقالة من الهندسة . لا شك أن أينشتاين كان سيُسرُّ بها ، بهدفها على الأقل إن لم نقل بأدائها .

**كان سيحب حتماً حقيقة أن يوجد مبدأ أساسي يوحِّد الفيزياء كلها ، في أغلب الظن .**

كان حتماً سيحب وجود مبدأ هندسي أساسي ــ لم ندركه بعد لسوء الحظ حتى الآن .

# 6

## جون إيليس

جون إيليس John Ellis فيزيائي نظري في المركز الأوربي للبحوث النووية ( سيرن CERN ) قرب جنيف ( سويسرا ) ، وقد قام بدور بارز في صياغة نظريتي التناظر الفائق والحقل العياري الهادفتين إلى توحيد قوى الطبيعة . وقد اشتهر بمحاولاته في ربط الأفكار المستمدة من فيزياء الجسيمات ، ومن الأوتار الفائقة مؤخراً ، بعلم الكون الرصدي .

**هل أستطيع في البدء أن أسألك إعطاء موجز قصير عن الهدف الذي تصبو إليه ، في رأيك ، نظرية الوتر الفائق ؟**

أعتقد أن الوتر الفائق أول مرشح جدي نملكه لصنع نظرية موحدة تضم كل التفاعلات التي تحدث في الطبيعة ، بدءاً بالثقالة المسؤولة عن احتفاظ الكواكب بمداراتها حول الشمس ، ومروراً بالكهرطيسية المسؤولة عن احتفاظ الالكترونات بمداراتها حول نواة الذرة ، ثم بالتفاعلات الشديدة أي القوة النووية ذات الأهمية الكبيرة في تماسك مكنونات النوى الذرية ، وأيضـاً بالتفاعلات الضعيفة المسؤولة عن عدة أشكال من النشاط الإشعاعي النووي . ولئن أمكن حتى الآن توحيد بعض من هذه التفاعلات بشكل جزئي ، إلا أننا لا نملك أساسـاً متينـاً للادعاء بقدرتنا على توحيدها كلها في صورة رياضية مفردة .

**ما جوهر هذه الفكرة النظرية ؟**

تقول فكرة الوتر الفائق بأن كل الجسيمات التي كنا نظنها عنصرية ، أي نقاطـاً صغيرة غير ذات بنية داخلية ، ليست في الحقيقة كائنات نقطية بتاتـاً ، بل هي في الأساس حلقات صغيرة مصنوعة من وتر تتحرك عبر الفضـاء وهي تهتز .

**ماذا تكون بالضبط هذه الأوتار ؟ وكيف يجب أن نرسم صورتها في الذهن ؟**

دعنا أولاً نفحص صورة الجسيم الأولي القديمة. لدينا هنا مجرد نقطة، وعندما يتحرك الجسيم في الفضاء تستطيع أن تتصور أنه يرسم خطاً يسمونه «خطاً عالمياً». أما في النظرية الوترية الفائقة فالجسيم في كل آن هو بالفعل حلقة صغيرة يمكنك أن تتصورها على شكل أنشوطة أو شيء من هذا القبيل. وبتقدم الزمن تتحرك هذه الأنشوطة في الفضاء فترسم بحركتها شيئاً يشبه إلى حدٍ ما سطحاً أنبوبياً نسميه «مُلاءة عالمية». ذلك هو مسار الجسيم بموجب فكرة الوتر الفائق.

**علينا إذن أن نعتبر الجسيم بالفعل كائناً ممتداً يمكن أيضاً أن يكون له نوع من الحركة الداخلية. هل هذا صحيح؟**

نعم صحيح. فعندما نفكر في الذرات نعلم أنها مصنوعة من مكوِّنات؛ فيها الالكترونات تدور حول النواة المركزية؛ وفيها بالطبع النواة نفسها المصنوعة من مكوِّنات اسمها بروتونات ونترونات؛ وهذه الكائنات مصنوعة بدورها من مكوِّنات اسمها كواركات. والكواركات، بموجب النظرية الوترية الفائقة، كائنات ممتدة أيضاً لكنها ليست مصنوعة حقاً من مكوِّنات أساسية أكثر منها. أعني أنها ليست مصنوعة من «كُوَيْركات subquarks» تقبع داخلها؛ بل هي قطعة مفردة وترية الشكل وغير ذات بنية داخلية — إن لها «مقاساً» و«المقاس» النوعي لتلك الأنشوطة الوترية يبلغ، في رأينا، قرابة $10^{-33}$ سم، أي واحداً من ألف مليار مليار من قطر النواة.

**إذا كانت الجسيمات بكل أنواعها مصنوعة، على تلك الحال، من حلقات خيطية صغيرة، فكيف تحصل الفروق فيما بين شتى الجسيمات؟ أي لماذا يوجد هذا العدد الكبير من أنواع الجسيمات التي كنا من قبل نقول بأنها كائنات أساسية؟**

أعتقد أن من الخير أن نفكر في صورة الأوتار التقليدية التي نعرفها ونحبها، كأوتار الكمان مثلاً. فأنت تعرف أنك إذا نقرت وتر الكمان أمكنه أن يهتز بتواترات عدة مختلفة — يقال إن له عدة مدروجات. والوتر الفائق شيء من هذا القبيل. فأنواع الجسيمات الأولية المختلفة تقابل، في اعتقادنا، الأشكال المختلفة لاهتزاز تلك الحلقة؛ إنها أشبه بالانغام المختلفة التي يمكن أن تُعزف على وتر كماني واحد. هناك في الحقيقة عدد غير محدود من الأساليب الاهتزازية التي يمكن أن يتخذها الوتر الفائق. والجسيمات الأساسية التي نعرفها فعلاً حتى اليوم، والأشياء التي نحن مصنوعون منها، تقابل بالضبط المدروجات الأخفض، فتشبه كثيراً أخفض الأنغام التي يمكن أن تُعزف على وتر واحد معين.

**هل تريد أن تقول إن الفرق بين كوارك علوي وكوارك سفلي، مثلاً، ناجم إلى حد لابأس به عن اختلاف أسلوب الحركة التي تدور في تلك الحلقة الخيطية الصغيرة؟**

هذا صحيح . إن هذا الوتر الفائق ، بالاضافة إلى اهتزازه في الفضاء ، كثير الشبه بوتر كمان تقليدي ، وله أيضاً بعض درجات حرية داخلية لا يمكن في الحقيقة تخيلها في صورة اهتزازات بسيطة في الفضاء؛ والفرق الفعلي بين كوارك علوي وكوارك سفلي ، مثلاً ، يُفترض أن يكون نوعاً من التراكب لتلك الخواص الداخلية وتلك الاهتزازات في الفضاء .

**هل يمكن أن نفهم من ذلك أننا نستطيع ، إذا كنا نملك أجهزة ذات مقدرة كافية ، أن نسبر مباشرة وعملياً هذه الحلقات الصغيرة ــ أن نظهرها بالفعل بدلاً من أن نقبل بكل بساطة أنها موجودة في مكان ما ؟**

مبدئياً ، نعم . أما عملياً فأعتقد أن ذلك صعب جداً جداً . فلكي نرى حقاً هذه البنية الحلقية ضمن الجسيم علينا أن نجري تجارب تسبر طاقات تبلغ $10^{19}$ جاف GeV ، أي قرابة عشرة ملايين مليار مرة من الطاقات التي استطعنا بلوغها حتى الآن في مسرعاتنا الجسيمية . وأخشى أن يكون بناء مسرع لفعل شيء من هذا القبيل باهظ التكاليف لدرجة لا تُصدق ، ونحن لا نملك على الأرجح التقانة اللازمة لذلك .

**إنني على يقين من صحة ما تقول . لكن هب أننا استطعنا بلوغ تلك الطاقات . فهل سنتمكن من قصّ هذه الحلقات ومن فتحها بحيث نحصل على أوتار مفتوحة بدلاً من حلقات مغلقة ؟**

أعتقد أن ذلك غير ممكن على الأرجح ، رغم أنه قضية رأي . فبعض الناس يرون أن بالإمكان فتح الأوتار فعلاً ، كما تقول ، وأن من المحتمل وجود أوتار مفتوحة ، كما يمكن أن توجد أوتار مغلقة . أما أنا فأميل إلى تفضيل النظرية التي لا تحوي سوى أوتار مغلقة .

ولكن قد يحدث للوتر أن ينفك وينحل عندما تسخن المادة إلى درجة من الحرارة عالية جداً . لكن هذا ليس في الوقت الحاضر سوى تكهن لا نملك الآن مقومات تبريره .

**لدي سؤال آخر يخص هذه الحلقات الصغيرة في حال الجسيمات المشحونة بالكهرباء . هل نتخيل أن الحلقات تحمل شحنة كهربائية وأن هذه الشحنة موزعة بالتساوي على طولها ؟**

إن هذا يعود بنا إلى النقطة التي كنت أحاول معالجتها من قبل . يجب أن لا تفكر بالجسيمات العنصرية ، كالإلكترون الذي يحمل شحنة ، على أساس أنها تحوي مكوِّنات عنصرية تحمل شحنات فردية أصغر تنضاف معاً لتصنع الشحنة الكلية للإلكترون . الحقيقة أن ما نسميه شحنة كهربائية لا بدّ أن يكون خاصة إجمالية من نوع ما يمتلكها الجسيم بكيانه كله ، ولو اهتز الوتر بأساليب أخرى لبدا أنه يملك شحنة كهربائية مختلفة .

**أي ، بتعبير آخر ، إن الشحنة الكهربائية قد تكون ميزة لحركة الوتر لاشيئاً ألصق به لصقاً ولا كائناً أساسياً.**

نعم ، أرى أن تلك قد تكون طريقة جيدة في التفكير بهذا الأمر .

**غالباً مايتساءل الناس عن كنه الشحنة الكهربائية ، وأنت عموماً لاتستطيع أن تقول شيئاً غير أنها خاصية أساسية ؛ ولكن كأنك تقول أن بالإمكان تفسير الشحنة الكهربائية على أساس دينامي .**

دعنا نعد بالفكر إلى ما نعنيه فعلاً بعبارة شحنة كهربائية . إننا نعني أن هناك حقلاً سميناه الحقل الكهرطيسي وهو الشيء المقترن بالشحنة الكهربائية ؛ وإن الحقل الكهرطيسي هو المسؤول عن الإمساك بالإلكترونات حول النواة ، أو المسؤول عن الأمواج الراديوية مثلاً .

والواقع أن الحقول الكهرطيسية نفسها مترافقة مع جسيمات تدعى فوتونات . وهذه الفوتونات ، هي الأخرى ، نمط آخر لاهتزاز الوتر ، تماماً على شاكلة أن الإلكترون نمط لاهتزاز الوتر . وعلى هذا فإن ما نعتبره شحنة كهربائية هو حقاً اقتران قطع مختلفة من الوتر معاً وتهتز بأنماط مختلفة قليلاً ، وليس الفوتون بأكثر أو أقل عنصرية من الإلكترون .

**إن إحدى السمات الخارقة في النظرية الوترية الفائقة هي أن تلك الحلقات لاتعيش في فضائنا العادي ذي الأبعاد الثلاثة ، بل في زمكان ذي عشرة أبعاد . فما سبب ضرورة ذلك ؟**

يتبين أن صياغة النظرية الوترية بما يجعلها متماسكة على صعيد تقدير التصحيحات الكمومية تقتضي ، إذا لم يكن للوتر حرية أخرى ، عدداً خاصاً من الأبعاد . ولو كانت النظرية لا تحوي سوى ما ندعوه بوزونات ، وهي جسيمات كالفوتون ذات سبين صحيح ، لاقتضت صياغة النظرية ستة وعشرين بعداً . آسف أني لا أستطيع إعطاءك شرحاً بسيطاً جداً لهذا الأمر ، إنه مجرد استنتاج رياضي .

والآن ، إذا عقّدنا النظرية قليلاً ، وأدخلنا الفرميونات أيضاً ( الفرميونات جسيمات ذات سبين نصفي ، كالإلكترون مثلاً ) يصبح العدد المناسب عشرة . وما زلنا بالطبع بعيدين عن الأبعاد الثلاثة الفضائية والرابع الزمني التي يبدو أننا نعيش فيها .

**كيف يمكن أن نجعل النظرية متماسكة مع أننا لا نشعر إلا بثلاثة أبعاد مكانية وواحد زمني ، إذا كان هناك حقاً عشرة أبعاد ؟**

ما عليك سوى أن تقول في نفسك : حسن ، هناك ستة أبعاد زمكانية إضافية ، وربما إثنان

وعشرون ، علينا أن نتخلص منها . عندئذ تُقوقِعها وكأنك تعالج بكفيك صفيحة من الورق لتصنع منها كرية صغيرة . ويمكن أن نتخيل أن الفضاء الجزئي من فضائنا العادي يشبه ورقة جريدة مبسوطة مستوية ، فإذا لففتها على نفسها لتصنع منها أنبوباً دقيقاً تكون قد « رصصت » سطح الجريدة الأصلي ذا البعدين إلى أن جعلته ذا بعد واحد هو طول الأنبوب .

بهذه الطريقة يمكن أن نتخيل عملية من هذا القبيل تتناول أبعاد الزمكان الإضافية الستة أو الاثنين وعشرين فتصبح ملفوفة أو مدروجة ، وتبقى الأربعة الأخرى منشورة ، وهي التي تقابل طول الأنبوب المصنوع من الجريدة .

**هناك حتماً طرائق عديدة لفعل ذلك ؟**

حتماً . إن ما فعله النظريون حين تناولوا هذا الموضوع كان أن كتبوا مجموعة من الشروط بدت ضرورية لتكون آلية الالتفاف معقولة . ومع أن هذه الشروط كانت محكمة جداً فقد بدا أن هناك قرابة عشرة آلاف إمكانية مختلفة للف الجريدة . وعندئذ اضطلع بعض الفيزيائيين باختبار كل هذه الآلاف العشرة من الطرائق لمعرفة ما إذا كان فيها ما يشبه عالمنا الواقعي .

**تعني أنها كلها تقود إلى أنواع من الفيزياء تختلف بحسب مجالات الطاقة التي يمكن أن نرصدها ؟**

هذا صحيح . يمكن مثلاً لإحدى تلك الطرائق أن تعطي فوتونين بدلاً من فوتون واحد . كما يمكن لأخرى أن تعطي **ثلاثة** فوتونات بدلاً من واحد فقط . أو يمكن لبعضها أن تعطي ، بدلاً من الإلكترونات الثلاثة التي نعرفها في عالمنا القائم (عندما أقول ثلاثة إلكترونات أعدُّ فيها الميون **muon** ، وهو جسيم يشبه الإلكترون جداً إلا أنه أثقل منه قليلاً ، والتاوون **tauon** ، وهو يشبه الالكترون أيضاً وأثقل من الميون ) إلكتروناً رابعاً من شأنه أن يكون أثقل من التاوون . لكننا نملك أسباباً تدعو إلى الاعتقاد بأن الأمر ليس كذلك في العالم الواقعي ؛ وعلى هذا نسعى إلى صوغ نظريات لا تعطي سوى جسيمات إلكترونية وفوتون واحد فقط .

**فعدد الجسيمات والقوى وطبائعها يتعلق إذن بطريقة التفاف الأبعاد الإضافية على نفسها — أي بالتوبولوجيات المختلفة الممكنة ؟**

هذا صحيح . الواقع أنك قد تستطيع ربط عدد الجسيمات الإلكترونية بعدد الثقوب التي تحصل عليها حين تلف تلك الأبعاد الإضافية على نفسها . وإذا فكرنا بطريقة التشابه مع الجريدة ، مثلاً ، يمكن أن نقول إن الجريدة الملفوفة لها ثقب واحد ؛ لأنك إذا نظرت على طول الأنبوب لا ترى سوى

ثقب واحد يخترق جسم الأنبوب . لكنك قد تستطيع أن تتخيل أيضـاً (بشيء من الإحساس التجريدي على الأقل) أن الجريدة ملتفة بشكل يوجد فيه أكثر من ثقب . عندئذ تدل رياضيات هذه النظريات على أن عدد مثل هذه الثقوب هو الذي يحدد لك عدد الجسيمات الشبيهة بالإلكترون .

**يبدو أننا بدأنا نشرح الطبيعة بلغة التوبولوجيا (هيئة ذلك الفضاء الأكثر أبعاداً) بدلاً من الطريقة القديمة في افتراض أن الأشياء كما هي فحسب .**

نعم . وقد سبق أن قلت إننا ، في النظرية الوترية الفائقة ، لا نعتبر أن الجسيمات ، التي تبدو لنا الآن أولية ، مكونةٌ من أشياء أصغر منها . فقد كان من عادة الناس أن يتخيلوا أنك قد تستطيع الحصول على أنواع مختلفة من شبيهات الإلكترون ، وذلك بأن تأخذ تلك المكوّنات الأصغر فرادى وأن تُركّبها معاً من جديد بأنماط مختلفة فتحصل على ما تريد .

ولكن ما هكذا تجري الأمور مع الأوتار الفائقة . ففي هذه النظرية ، وكما قلتُ ، تتعلق تلك الأنواع الإلكترونية بالثقوب المختلفة التي يمكن أن تحصل عليها عندما كنت تقوم بلف جريدتك الخيالية .

**وبالعودة إلى التوبولوجيات المختلفة فهمت منك أن في الأمر الآن غموضـاً كبيراً بخصوص التوبولوجيا الخاصة التي تنطوي على أوصاف عالمنا هذا ، وأن هناك عدداً كبيراً من المتنافسات . وهذا يبدو نقطة ضعف حقيقية في النظرية ، لأن النظرية لا تقود إلى خيار وحيد . فهل هذا ناجم عن الجهل فحسب ؟ أو ، بتعبير آخر ، هل يؤمل من التحريات القادمة أن تنجلي عن توبولوجية وحيدة تُفرز العالم الحقيقي ، أم أن الغموض سيظل قائماً ؟**

لا أعتقد أننا نعرف جواب هذا السؤال في الوقت الحاضر . لكننا ، عندما نفهم النظرية فهماً أحسن ، يمكن أن نستنبط أن هناك طريقة وحيدة منطقية للف الجريدة على نفسها ، وأن تلك الطريقة هي التي اتبعها عالمنا هذا .

لكن الامكانية الأخرى هي أن نجد بالفعل عدة طرائق منطقية للف الجريدة على نفسها ، وأن تلك القطع المختلفة من العالم قد اختارت أن تلف الجريدة بطرائق شتى . وهذا يمكن أن يعني ، مثلاً ، أن في العالم منطقة ما ، هناك أو هنالك ، أو عالماً آخر ربما يملك فوتونين فعلاً أو ربما كان عنده أربعة إلكترونات . وأنا لا أظن في الوقت الحاضر أننا نستطيع أن نحسم الموضوع بين هذين البديلين .

**وربما كان السبب في رؤية ما نراه من جسيمات ذا صلة بحقيقة أننا ما كنا لنوجد هنا ــ أي لما نشأت الحياة ــ لو لم يكن العالم كما هو أو يكاد.**

أعتقد أنه لو كان عدد الجسيمات الإلكترونية أو عدد الجسيمات الفوتونية مثلاً غير ما هما عليه لأمكن أيضاً وعلى الأرجح بناء شيء يكون ذا أهمية بخصوص العالم. إنه لن يكون مثل عالمنا بالضبط، وربما كان فيزيائيوه الذين يناقشون بنيته مختلفين عنا نحن. لكنني أعتقد مع ذلك أنه، على الأرجح وفي عدة أحوال، يمكن أن يحوي فيزيائيين.

**وقضية الالتفاف هذه ــ هل هي من الأشياء التي نتوقع أن نفهمها دينامياً؟ هل سيوجد قوى، بمعنى ما، تسبب التفاف الأبعاد الإضافية على نفسها، أم أن الأمر لا يتعدى تجريداً رياضياً مقصوداً؟**

سيوجد هناك قوى بمعنى ما. فالوتر نفسه، مثلاً، له وتر. دعنا نَعُدْ إلى وتر الكمان الذي تكلمنا عنه منذ قليل. يمكنك أن تولِّف وتر الكمان بتغيير قوة الشد عليه. وهكذا الأمر أيضاً فيما يخص الوتر الفائق، فهو يتمتع بنوع من التوتر الأصيل. وهذا التوتر الداخلي يتعين بالبنية الأساسية للنظرية، لكن له بالأحرى الخاصة نفسها. فهذا التوتر نوع من القوة الأصيلة يمتلكها الوتر نفسه.

**هل تسهم هذه القوة بشكل ما في التفاف الأبعاد الاضافية؟**

إن هذا التوتر يؤدي بالفعل دوراً هاماً. ولو أردنا التعبير عن هذا الدور بلغة التشكيلات التوبولوجية لجريدتنا تلك لقلنا إن هناك «حواجز» بين مختلف الطرائق في لف الجريدة. إذ يوجد شيء يمنع الجريدة من العودة تلقائياً إلى انبساطها الأصلي، لكننا لا نعرف ما هو في حالة الوتر الفائق. كما أننا لا نملك القواعد النظرية البحتة التي تتيح لنا أن نحسب قطر «أنبوب الجريدة». فربما كان من رتبة 10 − 33 سم كما ذكرت أعلاه، أو 10 − 34 أو ربما 10 − 32. والموقف الحالي هو أننا لا نملك أية وسيلة لحساب «المقاس» المطلق لهذه القطعة الملفوفة من «الجريدة». لكن الأمل كبير في العثور على طريقة لحسابه في وقت قريب، وربما كان هذا الموضوع ذا صلة بمفعولات من رتبة أعلى في النظرية مثل التصحيحات الكمومية، كمفعول كازيمير Casimir الذي يولِّد قوة بين صفائح ناقلة كهربائياً. إذ ربما كان شيء من هذا القبيل عاملاً في الوتر الفائق، لكن هذا لم يُبرهن عليه بعد.

**يبدو إذن أن دينامية هذا «التقوقع» الطوعي ــ التفاف الأبعاد الاضافية على نفسها ــ مسألة عصية جداً على الفهم.**

أظن أن ذلك صحيح تماماً. وربما كانت فكرة التقوقع برمتها صائرة إلى سلة المهملات في الأسبوع القادم. وفي هذه الأيام يتسلى بعض الفيزيائيين بتجريب فكرة عدم صوغ النظرية الوترية في ستة وعشرين بعداً أو في عشرة أبعاد بل مباشرة في أربعة أبعاد، ولا يتعرضون إلى إمكانية وجود أبعاد إضافية متقوقعة.

**كيف يمكن ذلك؟**

بكلام عام أقول: يُلجأ إلى إبدال درجات الحرية في ذلك الزمكان غير المألوف، أي الأبعاد الإضافية، بإحداثيات في فضاء داخلي بحت، قريب الشبه بفضاء الشحنة الكهربائية الذي تكلمنا عنه سابقاً. فتبيَّن أن الأبعاد القديمة الستة والعشرين، من أجل الأوتار البوزونية، والعشرة في النظرية التي تحوي فرميونات، ليست ضرورية. فأنت تستطيع أن تصوغ النظرية في أبعاد أقل من ستة وعشرين أو من عشرة إذا تناولت بعض تلك الأبعاد الزمكانية بطريقة رياضية صحيحة. وهذا أمر يصعب شرحه بعض الشيء.

**يبدو لي أن هذا رجوع إلى الوراء. فمن السمات الجذابة للمحاولات الحديثة في توحيد قوى الطبيعة إبدال ما كان يعبر تناظرات وخصائص داخلية تجريدية ببنى هندسية ملموسة تتخذ شكل أبعاد إضافية. أليس ذلك في واقع الأمر خطوة إلى الوراء تُلغي ما سبق؟**

ربما كان في عبارة خطوة إلى الوراء بعض المبالغة. فأنا أعتقد أن علينا فقط أن نذهب إلى حيث تقودنا الرياضيات والفيزياء، وهذا في رأيي خطوة أقرب أن تكون إلى الأمام منها إلى الوراء.

لكن من الممكن جداً أن تكون كل هذه النظريات الوترية في أبعاد أقل مجرد مظاهر مختلفة للنظريات الأصلية ذات الأبعاد العشرة أو الستة وعشرين. وقد يكون الفرق أيضاً اختلافاً أسلوبياً في الكلام عن شيء واحد.

**قبل أن نترك موضوع الأبعاد الإضافية وتقوقعها، هل صحيح أن تلك الحلقات الصغيرة التي تكلمنا عنها يمكن فعلاً أن تلتف حول تلك الأنابيب، حول الجريدة المدروجة.**

يمكنك أن تتخيل تشكيلات أخرى أعقد بكثير. فإذا عدنا إلى التشبيه بالجريدة وتصورنا أن لدينا حلقة وترية فإنك تستطيع أن تلفها حول الجريدة المدروجة مرة واحدة، أو مرتين أو ثلاثاً أو أكثر.

**هل يمكنك أن تضع لفافة ضمنها أيضاً؟**

نعم. هذا ممكن إذا كان لديك نوع من الوتر أعقد قليلاً. ولكن نعم، يمكنك أن تتخيل إمكانيات كثيرة من هذا القبيل. فإذا أردت أن تصنع لفافة، مثلاً، ربما كان عليك أن لا تفكر

بقطعة وترية بل بعصابة مطاطية تستطيع أن تضع اللفافة فيها. وهكذا يوجد، نعم، خصائص توبولوجية أخرى تقدمها النظرية، مع أنني لا أعتقد أن بالامكان القول بأننا نفهم هذه الخصائص.

**يبدو من المؤكد أن على الفيزيائيين النظريين أن يغوصوا في فروع من الرياضيات لم يلقوا لها بالاً حتى الآن، وذلك كي يمسكوا بناصية النظرية الوترية الفائقة.**

فعلاً. وأنا شخصياً أُنقِّب في المكتبات علني أجد موسوعة رياضية أصطاد منها كل تلك المفاهيم الرياضية كالتآصل homology وسواه مما لم أكلف نفسي عناء دراسته قبل الآن!

**هل لنا أن نلتفت الآن إلى الاختبارات التجريبية الممكنة للنظرية، لأنني أعتقد أننا متفقون جميعاً على أننا هنا أمام فكرة مثيرة وجميلة جداً، لكن العلم يجب أن يستند في نهاية الأمر إلى التجربة. فما هي الاختبارت التجريبية بصدد النظرية الوترية الفائقة؟**

ذكرتُ منذ قليل أن إحدى الإمكانات المستمدة من الوترية الفائقة هي احتمال وجود جسيمين شبيهين بالفوتون وربما ثلاثة. وهذه الفوتونات الإضافية لا يمكن أن تكون عديمة الكتلة كالفوتونات التي نستفيد منها في هذا البرنامج الاذاعي. بل عليها أن تكون ذات كتلة من قبيل الجسيمات W و Z التي عُثر عليها في سيرن CERN منذ سنين قليلة. لكن من الممكن تماماً أن يوجد جسيم آخر من النوع Z ذي خصائص مستمدة من الوترية الفائقة. ومن جملة ما يقوم به الفيزيائيون في سيرن الآن هو البحث عن بصمات ممكنة لهذا البوزون Z الإضافي.

**وهل يوجد أنواع جسيمية أخرى تتنبأ بها النظرية؟**

إضافة إلى الجسيمات المعروفة الشبيهة بالإلكترون، والنترينوهات التي تقابلها، والكواركات ذكرتُ أيضاً إمكانية وجود أنواع جسيمية مادية تقوم بما يشبه وظيفة الكواركات، لكنها في مجال آخر تتصرف جزئياً كالإلكترونات، وهي ما تسمى الجسيمات اللبتوكواركية leptoquarks. وهذه الإمكانية مستوحاة من الوترية الفائقة؛ ومع أننا لا نستطيع أن نؤكد وجود اللبتوكواركات، إلا أنها على الأقل أشياء يبدو من المعقول أن نبحث عنها تجريبياً.

**ما هي حظوظ أن نجد برهاناً تجريبياً على هذه النظرية في المستقبل المنظور؟**

من الصعب جداً تحديد ذلك. فأنا لا أعتقد أننا نفهم النظرية بشكل يكفي لمعرفة فيما إذا كانت تلك الأنواع الفوتونية الجديدة أو الأنواع الجسيمية المادية الجديدة هي حقاً من النبوءات الموثوقة للنظرية.

وحتى لو حصلت لدينا القناعة بأنها نبوءات موثوقة، فإننا ما نزال عاجزين عن معرفة كتلها والطاقات اللازمة لإمكانية إنتاجها في مسرِّعاتنا. فنحن في الوقت الحاضر نتلمس طريقنا في الظلام ونحاول معرفة فيما إذا كنا نستطيع الوصول إلى شيء ما. وقد لا يكون هناك أي شيء البتة.

**لقد جرت العادة لدى الفيزيائيين، عندما يواجهون هذا النوع من المسائل، أن يعالجوا الموضوع من زاوية علم الكون للتأكد منه. فمن المظنون أن العالم في مراحله المبكرة، فيما يسمى الانفجار الأعظم، كان يحوي طاقات هائلة جاهزة، مما كان يمكن أن يتيح للأوتار الفائقة نشاطاً يترك في أوصاف العالم بصمة يمكن أن نراها اليوم. فهل تعتقد بصحة ذلك؟**

هذا ممكن بالتأكيد. فهناك، مثلاً، من الأشياء التي نعتقد أنها موجودة اليوم، شيء اسمه «المادة الخفية». إنها مادة غير مشعة، مادة لا تقترن بفوتونات، فلا نستطيع أن نراها بمرقاباتنا (تلسكوباتنا) لكننا نعلم أنها لا بدّ موجودة لأننا نستطيع، بطريقة تقريبية، أن نقيس القوى الثقالية المتبادلة فيما بين شتى جسيمات هذا الكون، ويبدو أن هناك حتماً نوعاً من المادة الخفية المظلمة تسلط جذباً ثقالياً يزيد على جذب المواد التي نراها.

أما عن ماهية هذه المادة الخفية فلا نعلم شيئاً، لكن من المحتمل بالتأكيد أن بقايا جسيمية متروكةً منذ المراحل المبكرة للانفجار الأعظم ما تزال تتجول هنا وهناك. وفي النظرية الوترية الفائقة من الممكن، على الأقل، أن يكون واحد من الأنواع الاهتزازية الوترية العديدة، واحد من تلك المدروجات إن شئت، جسيماً مستقراً بالفعل قد يكون باقياً منذ الانفجار الأعظم.

**إذا كانت النظرية الوترية الفائقة صحيحة، هل تظن أن العالم كان يمكن أن يتطور في مراحله المبكرة بشكل يختلف عن النموذج المعتمد، أي أن ديناميته كانت قد تعدلت بسبب وجود الوتر الفائق؟**

أعتقد أن هذا صحيح بالتأكيد. تصور أننا نعود القهقرى إلى مراحل أبكر فأبكر في نشأة العالم. عندئذ سنجد مثلاً أن كل العناصر الخفيفة التي نعرفها في العالم، كالهليوم والدوتيريوم والتريتيوم الخ، قد صنعت عندما كان عمر العالم قرابة مئة ثانية. والمظنون، في تلك المرحلة، أن قوانين الفيزياء المعروفة كانت صالحة تماماً لتوصيف ما حدث بعدئذ. لكنك إذا رجعت نحو المراحل الأبكر ستجد أن من الممكن تماماً أن تعطي الوتريةُ الفائقة نبوءات تختلف عن النموذج المعتمد في تطور العالم المبكر. ولا أعتقد أننا نفهم اليوم النظرية بما يكفي لنصبح قادرين على رسم صورة لكيفية هذا التعديل. لكن من المؤكد أن أحد الأشياء التي يجب أن نأخذها في الحسبان، عندما نمعن في التراجع نحو أقدم تاريخ العالم، هو أن نجد عالماً ذا أبعاد تفوق الأبعاد الثلاثة المكانية

والبعد الزمني الرابع التي نعرفها الآن. وربما بلغ عدد أبعاده آنذاك عشرة أو ستة وعشرين.

**أو، بتعبير آخر، أن الالتفاف الذي تكلمنا عنه لم يحدث إلا بعد حين قصير من انبثاق العالم؟**

صحيح، من الممكن جداً أن العالم كان له في بداياته المبكرة جداً ستة وعشرون بعداً أو ربما عشرة أبعاد، وأن بعض هذه الأبعاد، ولسبب لا نعرفه جيداً حتى الآن، قررت في أثناء تطور العالم أن تلتف على نفسها، وبعد ذلك استمر العالم في مسيرته بالأبعاد الأربعة التي نعرفها اليوم.

**إذا نظرنا الآن إلى الموضوع من زاوية فلسفية، وفحصنا المسيرة التاريخية للنظرية الوترية الفائقة، يبدو أن الفيزيائيين قد انزلقوا إلى هذه الأفكار بالمصادفة. ولدينا اليوم إجراءات رياضية يبدو فعلاً أنها، رُغم التجريد الذي فيها، يمكن أن تقود إلى أوصاف كل الجسيمات والقوى الطبيعية. فلماذا كانت الحال كذلك؟ هل يوجد مبدأ أساسي عميق يستند عليه كل شيء أم أن الأمر نوع من المصادفة التي أتاحت لنا اكتشاف الصيغة التي أفشت أسرار الطبيعة؟**

أعتقد أن من الصحيح القول بأن المصادفة كان لها دور في اكتشاف النظرية الوترية، قبل اليوم بخمسة عشر أو ستة عشر عاماً. والواقع أن الناس لم يفكروا حين اكتشافها بأنها نظرية كل شيء. ففي تلك الأيام كانت تُعدُّ بديلاً عن الكواركات في شرح التفاعلات النووية. ثم وجدنا أن النظرية الوترية لم تكن لتشرح بالشكل الجيد تلك القوى النووية. بل وجدنا بدلاً من ذلك شرحاً بلغة النظريات العيارية، حيث تنتقل التفاعلات الأساسية، كالكهرطيسية والقوة النووية الشديدة والقوة الضعيفة، بوساطة جسيمات سبينها واحد، كالفوتونات مثلاً. وفي السنين الخمس عشرة الأخيرة صارت اللغة المستعملة في مناقشة أمور الفيزياء لغة النظريات العيارية.

وبالعودة الآن إلى النظرية الوترية نعتقد أنها نسخة فائقة من نظرية عيارية ذات عدد هائل من التناظرات ما نزال في بدايات فهمها. وعليها أن تحوي نظرية عيارية من النوع الذي كنا نتعامل معه في السنين الخمس عشرة الأخيرة، لكن عليها أيضاً أن تحوي أشياء أخرى عديدة. عليها مثلاً أن تحوي نسبية أينشتاين العامة، كواحد آخر من الأعداد الهائلة من التناظرات الخاصة التي تحويها. وفي هذه الأيام يجب اعتبار النظرية الوترية نظرية مرشحة لتوحيد الثقالة (أي نسبية أينشتاين العامة) مع أنواع النظريات العيارية التي أنشأناها في السنين الخمس عشرة الماضية بخصوص التفاعلات الشديدة والضعيفة والكهرطيسية.

**هذا يثير سؤالاً سأطرحه عليك في أية حال. أعتقد أن عدداً من غير المختصين يمكن أن تتملكهم بعض الدهشة أمام نظرية تستهدف الجسيمات الأساسية في بنية المادة والقوى العاملة**

**فيما بينها، وتنطوي في الوقت نفسه على الثقالة بمثل هذه الكيفية الأساسية. فهل هناك طريقة سهلة لإيضاح أهمية الثقالة في الفيزياء الجسيمية؟ لماذا يجب أن تكون الثقالة حاضرة في هذه الفيزياء؟**

حسن، من المعلوم أن للجسيمات العنصرية قوى ثقالية. حتى إنها قد قيست بالفعل في المختبر. يمكنك أن تبطئ حركة جسيم عنصري إلى أن يتحرك ببطء شديد جداً، عندئذ تجد أن مساره ينحني بفعل قوة الثقالة الأرضية. وهذا يعني بالتأكيد أن للجسيمات العنصرية قوى ثقالية، وأننا إذا ادعينا بحق امتلاك نظرية كل شيء علينا أن نستيقن من احتوائها على القوى الثقالية في سبيل شرح التفاعلات الأساسية.

لكن هناك قضية أعمق. فمنذ أيام أينشتاين والثورة الكمومية ظهرت معضلة كبيرة في الفيزياء الأساسية لم يمكن حلها قط، وهي كيفية التوفيق بين الثقالة والنظرية الكمومية. إنها قضية كافح في سبيلها عدة فيزيائيين مشهورين ولكن دون جدوى، فلم يستطيعوا أن يحصلوا على نظرية كمومية في الثقالة تعمل كما يجب. واليوم يبدو أن نظرية كل شيء الوترية الفائقة تلك يمكن بالفعل أن تنجح في هذه المهمة. فالتصحيحات الأعلى رتبة، في بعض النظريات الوترية على الأقل، تبدو محدودة، وهذا شيء نادر جداً في نظرية كمومية. والواقع أننا كنا، عندما نحاول صنع ثقالة كمومية، نحصل دوماً في محاولة حساب شيء ما على قيمة له لا نهائية الكبر بشكل لا يمكن التحكم به ــ وهذا شيء لا يمكن أن نجد له أي معنى. لكننا الآن نملك على ما يبدو، ولنلمس الخشب، نظرية حسنة السلوك. ذلك هو أحد الأسباب الرئيسية التي دعت إلى الاهتمام بالنظرية الوترية. إن فيها بذور القدرة على التوفيق بين ثورتين هما أعظم الثورات الفيزيائية في القرن العشرين، أقصد ميكانيك الكم والنسبية العامة.

**إنها ليست أول محاولة في سبيل جمع الطبيعة كلها في نظرية موحدة واحدة ــ نظرية كل شيء فهل ستكون الأخيرة؟**

من يدري! إنك تسألني أن أنظر ــ للكشف عن الغيب ــ في كرة سحرية بلورية عكرها واضح!

**لنفترض مع ذلك أنها لن تعمل على ما يرام. فهل تعتقد أنها الفرصة الأخيرة لصنع نظرية ترسم للطبيعة، وبطريقة بسيطة، صورة مؤلفة من أجزاء وقطع رياضية؟**

لا أعتقد أنها الفرصة الأخيرة. ففيما يتعلق بتجاربنا في الفيزياء الجسيمية نستطيع إجراء تجارب في طاقات من رتبة 100 جاف، أي زهاء مئة مرة من طاقة البروتون الكتلية. والثقالة قوة لها أيضاً سلّم طاقي أصيل خاص بها يسمى طاقة بلانك. وهذه الطاقة من رتبة $10^{19}$ جاف، وهي أكبر

بمراتب عَشرية كثيرة من الطاقات التي نستطيع بلوغها اليوم في المختبر.

والمظنون أننا قد نكتشف بين 100 جاف و $10^{19}$ جاف كل المعلومات اللازمة لصنع نظرية كل شيء. والوترية الفائقة، كما نعرفها اليوم، نظرية تكهنية جزئية جداً، أو مجنونة كما يقول بعضهم، توحي بأننا قد نكون قادرين، بما نعرفه منذ الآن من الفيزياء في مجال 100 جاف، على أن نقفز دفعة واحدة إلى نطاق $10^{19}$ جاف. لكنها مغامرة قد لا تكون محمودة العواقب. وقد يترتب علينا أن نبذل جهوداً مضنية عبر فيزياء 1000 جاف و 10.000 جاف وأن نضمن لأنفسنا فهماً يتحسن بالتدريج، إلى أن نبلغ بإذن الله نظرية كل شيء في موعد مستقبلي بعيد.

ولكن حتى لو تبين أن النظريات الوترية المصنوعة حتى الآن ليست الجواب النهائي، فإنني أعتقد أنها أتت كلغة لمناقشة الفيزياء الأساسية وفيزياء الجسيمات العنصرية والفيزياء النسبوية. ولا أظن أن هناك أي احتمال في أن ننسى كل شيء عنها في المستقبل القريب. بل أعتقد أنها، حتى ولو لم تصبح نظرية كل شيء أو لم نستطع البرهان في المستقبل القريب على أنها نظرية كل شيء، ستظل مع ذلك جزءاً من لغة الفيزياء الأساسية.

**دعنا نعد قليلاً إلى الوراء وننظر إلى الموضوع من زاوية اجتماعية. فقد كتبتَ أن برنامج الوتر الفائق قد خلق «حماساً استبدادياً». وأنا أستطيع أن أؤكد من خلال خبرتي أن فكرة الوتر الفائق استحوذت على جمهور الفيزيائيين كما لم تفعل قبلها نظرية أخرى. فواضح إذن أن آراء الناس فيها قد تأثرت بالحماس والارتياح. فما هي، بكل موضوعية، المسائل الكبرى المتبقية؟ نعلم أن إحداها تخص طبيعة التقوقع. فهل هناك مسائل أخرى؟**

أعتقد أن منها مسألة معرفة فيما إذا كانت فكرة التقوقع ضرورية فعلاً أم أن بالإمكان صوغ النظرية في أربعة أبعاد منذ البداية بطريقة ما. أما إذا كان هناك تقوقع فلا بدّ لنا حتماً من أن نعرف كيف يحدث وما سبب أفضلية الشكل الاتفاقي «للجريدة» على سواه من الأشكال، مما يتيح لنا عندئذ أن نحسب، مثلاً، عدد الجسيمات الإلكترونية والفوتونية. وهذه مسألة ثانية مهمة جداً.

يوجد بالتأكيد أنواع أخرى من المسائل المهمة جداً. علينا مثلاً أن نفهم لماذا كان للجسيمات العنصرية المعروفة الكتل التي نعرفها. لماذا كان بعضها أخف بكثير جداً من طاقة بلانك التي هي $10^{19}$ جاف؟ ومن أين جاءت الكتل غير المعدومة. فنحن نعتقد أن الكتل تأتي من كائن غامض اسمه بوزون هِغز Higgs، لكننا نعلم أن شرح الأوصاف المحسوسة لبوزونات هغز يستدعي إضافة شيء إلى النظرية. ومنا من يعتقد أن هذا «الشيء الإضافي» هو التناظر

الفائق، وكلمة «فائق» الواردة هنا هي التي تعطي الوترية الفائقة اسمها، لأن الوترية الفائقة نسخة من الوترية تحوي التناظر الفائق. وهذا التناظر يبدو ضرورياً لإعطاء الجسيمات كتلاً مناسبة.

**كنا قد تحدثنا عن القوى الأساسية الأربع في الطبيعة؛ لكن بعضهم تكهن في السنوات الأخيرة بإمكانية وجود قوة أساسية أخرى أسموها القوة الخامسة. فإذا صح ذلك. هل يمكن ضمان مكان لتلك القوة الخامسة في المخطط الذي نحن بصدده؟**

دعني أقل في البدء إنني لست ممن يعتقدون كثيراً بالقوة الخامسة. وأرى أن البرهان التجريبي على وجودها ضعيف جداً جداً؛ وأنا، شخصياً، لا أحملها على محمل الجد المستهام بها. وبعد هذا، هناك أناس يدّعون أن بالإمكان إيجاد مكان للقوة الخامسة ضمن إطار الوترية الفائقة. ومرة أخرى أقول إن لدي شكاً في أمرها، وأميل إلى استبعادها.

**إن المرء ليطرب حق الطرب إذا امتلك نظرية تفسر كل شيء، وسنغتبط بالتأكيد إذا استطعنا بناء نظرية من هذا القبيل نثق بها. فهل يعني ذلك أنها ستكون نهاية الفيزياء وهل على الفيزيائيين بعدها أن يحزموا متاعهم ويذهبوا للبحث عن عمل آخر؟**

بالتأكيد لا أعتقد ذلك. فالواقع أن معظم الفيزيائيين ليسوا ممن يمتهنون اكتشاف قوانين طبيعية جديدة، بل يحاولون أن يفهموا بشكل أحسن الطريقة التي تتبعها الطبيعة في استغلال القوانين التي عرفناها. ومعظمهم يفعلون ذلك في إطار نوع من القوانين أو، كما نقول، باللاغرانجي أو الهاملتوني الذي اخترعه أحدهم من قبل. إن فيزيائيي الجسيمات العنصرية والفيزياء الثقالية هم الذين، فيما أرى، يهتمون حقاً بالبحث عن القوانين الجديدة. وأعتقد أن كل ما سيحدث، بعد أن نمتلك نظرية كل شيء، هو أن تصبح الفيزياء الجسيمية والفيزياء النسبوية كسواهما من فروع الفيزياء، كفيزياء المادة الصلبة أو المكثّفة مثلاً.

**أي ما يمكن تسميته، على ما أظن، بالفيزياء التطبيقية.**

حقاً، إن بعضها يمكن أن يسمى تطبيقاً، لكنني أخشى ألا يكون بعضها الآخر تطبيقاً حقاً.

**إذا عدنا إلى مسألة الشواهد التجريبية على النظرية، والكلفة الكبيرة للمسرعات، فإننا لا يمكن أن نتوقع بناء عدد أكبر مما لدينا، أو على الأقل لا نستطيع أن نتوقع بناء مسرعات في المستقبل ذات طاقات أعظم بكثير مما هو موجود الآن. ولذلك يبدو لي أن عبء اختبار النظرية الوترية الفائقة (أو أية نظرية كل شيء أخرى) سيقع على عاتق المسرعات المزمع بناؤها. وأنت تعمل في مختبر سيرن قرب جنيف. حيث تم تنفيذ واحد من أشهر المشروعات حتى اليوم، المسرِّع المسمى ليب *LEP*. هل هناك أمل في أن يستطيع ليب اختبار بعض الأفكار**

**التي تكلمنا عنها؟ هل سيكون لديه من الطاقة ما يكفي بالفعل لسبر غور المجال الذي تُختبر فيه النظرية الوترية الفائقة؟**

أعتقد أن أقصى إمكانيات **ليب** هي أن يستطيع إنتاج جسيم ثان من النوع Z، برغم أن ذلك قليل الاحتمال، لكننا سنكون على الأرجح سعداء بأن نحصل منه على برهان غير مباشر على ذلك الجسيم الوتري الفائق، هذا إذا حصل شيء من هذا القبيل. فأحد الأهداف الرئيسية من التجارب المزمع إجراؤها في **ليب** هو البحث بعناية كبيرة جداً جداً وبالتفصيل الدقيق عن خصائص الجسيم Z الأول. ذلك أن المعلومات المفصلة التي ستعطيها الاختبارات المقترحة لخصائص هذا الجسيم يمكن أن تفيدنا في معرفة إذا كان يوجد، أم لا، جسيم من جنسه يتوارى هنا أو هناك.

وللمسرع **ليب** إمكانية أخرى هي أن يتيح لنا فعلاً إحصاء العدد الكلي لأنواع الجسيمات العنصرية في العالم وهذا يمنحنا، بموجب الوترية الفائقة، القدرة على تحديد توبولوجية الفضاء المتقوقع، أي أنه سيخبرنا، بأسلوب ما، كيف التفّت «الجريدة» على نفسها.

بقيت إمكانية ثالثة هي أن بعض أنواع الجسيمات الإضافية الموجودة في بعض النظريات الوترية الفائقة يمكن أن تتولد في **ليب** أو أحد المسرعات الأخرى القائمة اليوم. نذكر مثلاً اللبتوكواركات التي تتصرف وكأنها مضمومة تتألف من كوارك عادي وإلكترون عادي. فليس من المستبعد أن يُنتج **ليب** بعضاً منها.

**متى نتوقع الحصول على بعض النتائج؟**

من المفروض أن تنطلق التجارب مع **ليب** في بحر عام ١٩٨٩.

**حصل في الشهور الأخيرة جدل حول إمكانية بقاء بريطانيا في سيرن كعضو في هذه المؤسسة الأوربية. فهل سيكون انسحاب بريطانيا، في أثناء هذه التجارب المثيرة، ضربة كبيرة حقاً للعِلم البريطاني؟**

أعتقد أن ذلك سيعني حقاً أن بريطانيا ستكون منسحبة من النوع الأساسي من العلم. تذكَّر أن العلم شيء تصنع فيه نظريات ثم يترتب عليك أن تختبرها بالتجربة. فالانسحاب من سيرن يعني أن بريطانيا ستعزل نفسها عن إمكانية إجراء تجارب. وأعتقد أنك لا تمارس علماً بدون تجارب.

# 7

## محمد عبد السلام

محمد عبد السلام مدير المركز الدولي للفيزياء النظرية في تريستا، بإيطاليا، وأستاذ في قسم الفيزياء في إمبريال كوليج في لندن. أسهم في العديد من الخطوات الهامة في تقدم الفيزياء الجسيمية والثقالة الكمومية ونال جائزة نوبل على أعماله في توحيد القوتين، الضعيفة والكهرطيسية. صرف اهتمامه في السنوات الأخيرة إلى نظرية الأوتار الفائقة.

**كان الاعتقاد السائد قبل مئة عام أن الفيزياء أشرفت على نهايتها: أن ميكانيك نيوتن وكهرطيسية مكسويل وفروع الفيزياء الأخرى تفسر حقاً كل مايحدث في الطبيعة وأن مهمتها أصبحت تقتصر على التدقيق في بعض التفاصيل الأخيرة. ثم تحطم هذا الاعتقاد عند مطلع هذا القرن مع بزوغ مايمكن أن نسميه «الفيزياء الجديدة». أما اليوم فيبدو أن هناك مرة أخرى شعوراً، رغم غموضه، باقتراب بزوغ نظرية كاملة تفسر كل شيء، نظرية تجمع في أحشائها الطبيعة برمتها تحت لواء تفسير واحد موحد. فهل هذا مجرد سراب أم أننا بالفعل على وشك أن نبلغ قمة الفيزياء النظرية في هذا العصر؟ مامدى حماسك حيال هذه الأفكار الجديدة؟**

إذا كان سؤالك يخص نظرية الوتر الفائق ومغزاها فإنني أشعر بحماس شديد. أما أن نكون قادرين على الحصول في يوم ما على ما يسمى نظرية كل شيء فأنا شخصياً لا أعتقد ذلك. إذ على كل حال يجب ألا نؤمن بوجود نظرية تصلح حتماً فيما يتعدى إمكان اختبارها. ففكرة نظرية كل شيء، كما هي اليوم، تعني أن هذه النظرية يمكن أن تخبرنا عن كل الظواهر التي تحدث فيما دون طاقة بلانك (نحو $10^{19}$ جاف). لكن اختبار النظرية مباشرة عند طاقة بلانك يستدعي بناء مسرعات تقدم هذه الطاقة. وفي المستقبل المنظور يجب أن يكون طول مثل هذا المسرع عشر سنوات ضوئية على الأقل! وعلى هذا لن نستطيع أبداً أن نجري أي اختبار مباشر لأي «نظرية كل شيء» صالحة في طاقات أعلى من $10^{7}$ جاف مثلاً. ولا يمكن أن نجري سوى اختبارات غير

مباشرة، لكن هذه الاختبارات لن تستطيع أبداً أن تتناول كل شيء. ونظرية الوتر الفائق جذابة بسبب مزاياها الأصلية الخاصة بها. لأننا في النهاية وجدنا فيها بديلاً حقيقياً من نظرية في الجسيمات النقطية. فمفهوم الجسيم النقطي هو الذي كان مسؤولاً عن الصعوبات الكأداء التي كنا نصادفها في نظرية الثقالة الكمومية.

**لماذا يجب أن نستبعد مفهوم الجسيمات النقطية؟**

لأن هذه العملية تَعِد ـــ للمرة الأولى ـــ بنظرية كمومية في الثقالة. وهذا نصر، سواء حصلنا أم لم نحصل على نظرية كل شيء نهائية. والكسب الإضافي هو أنها جاءت موحدة مع نظرية الكواركات ونظرية الجسيمات العيارية ـــ الفوتونات والجسيمات W و Z. ولكن حتى ولو لم يحدث هذا التوحيد فإنني أعتبر أن الأوتار تمثل تطوراً هاماً.

**ما الصفة الحاسمة التي يتمتع بها الوتر دون الجسيم والتي تتحكم القدرة على إنجاز التقدم الواعد؟ لقد استبدلنا بالجسيم النقطي جسماً محدود الصغر ـــ وتراً ذا طول من رتبة $10^{-33}$ سم.**

إن نظرية الأوتار تقدم شيئاً كان بور Bohr سيحبه ـــ طولاً أساسياً زهاء $10^{-33}$ سم. لكن النظرية، برغم محدودية هذا الصغر، ما تزال موضعية. ذلك هو الجانب المدهش فيها.

**ما معنى الموضعية هنا؟**

إنها تعني أن السببية ما تزال موجودة. أي أن الحوادث المنحصرة فيما يشبه الفضاء لا تؤثر بعضاً في بعض. إن جمال النظرية الوترية، برغم أننا ندرس أشياء ذات امتداد، هو أن التفاعلات الوترية تحدث في نقطة واحدة ـــ لا تعم طول الوتر كله. فالأوتار تنشقّ طولانياً وتتحد مجدداً في نقطة واحدة من طولها. وعندما تتلامس الأوتار فإنها تتلامس في نقطة. ذلك هو سر موضعيتها.

**على هذا يجب أن نفكر بالأوتار لا على أساس أنها مجرد نماذج لجسيمات المادة بل إنها أيضاً نماذج لأساليب تفاعل الجسيمات فيما بينها؟**

نعم، ومن وجهة النظر هذه تصبح قدرة الأوتار على تفسير الفيزياء كلها قضية ثانوية. وبرغم أن الأوتار مطروحة منذ أكثر من عشر سنوات فإن أنصارها، حتى أشدهم حماساً، لا يلحّون على هذه المزية البارزة إلحاحاً كافياً ـــ أي إنها قادرة على إفراز نظرية ثقالية كمومية موضعية وسببية.

**ما سبب اكتسابها هذه الشعبية فجأة؟**

إن المزية التقنية للتخلص من الشذوذ يمكن تصنيعها ضمن النظرية إذا تم توحيد الثقالة مع نظرية

خاصة ليانغ ـــ ميلز Yang-Mills . وهذا الاكتشاف الأساسي ، الذي تم على أيدي غرين وشوارتز ، يقود من جهة أولى إلى نظرية **وحيدة** تتوحد فيها الثقالة ومجموعة خاصة من جسيمات يانغ ـــ ميلز العيارية ، في حين أن عمليات التخلص من الشذوذوات تجعل من المعقول أن تكون هذه النظرية الوحيدة محدودة أيضاً ، هذا من جهة ثانية .

ولئن كنا ما نزال بحاجة إلى برهان محكم على أن هذه النظريات تعطي فعلاً نتائج محدودة ، إلا أن الأمل يبدو كبيراً .

## هل لك أن تشرح لنا معنى المحدودية ؟

إن معظم نظريات الثقالة الكمومية التي أُنشئت في الماضي كانت تعطي نتائج لا نهائية . هب أنك أردت حساب تبعثر غرافيتون بغرافيتون آخر . كان الجواب في النظريات الثقالية الكمومية ، قبل الوترية ، قيمة لا نهائية الكبر . والنظرية التي تعطي أجوبة لا نهائية نظرية غير منطقية وعديمة الجدوى . لكن النظرية الوترية الفائقة أول نظرية ثقالية كمومية تَعِد ، مثلاً ، بإعطاء نتيجة محدودة بخصوص تبعثر الغرافيتونات عن الغرافيتون .

والمهم أيضاً في نظرية الثقالة الكمومية الوترية هو أن الثقالة ليست الشيء الأبرز في الصورة الوترية .

وهنا يطيب لي أن أكرر ملاحظة كريس إيشام C.Isham من إمبريال كوليج . فقد قال إنه ، عندما كان طالباً ، بدأ العمل في مجال الثقالة الكمومية مع الأمل في أن يستطيع ، من خلال فرض شروط مناسبة منطقية على نظرية الثقالة ، جلاء سر **وجوب أن تكون الثقالة كمومية** . وبتعبير آخر أنه يمكن أن يشتق استكمام quantization بلانك من أفكار أينشتاين في التغير المساير covariance . وهذا هو بالضبط الطريق المعاكس ، كما يُرى من زاوية النظرية الوترية . فنحن قد بدأنا نجد أن استكمام بلانك يجب إدخاله أولاً ، في حين أن ثقالة أينشتاين تبرز كمفهوم ثانوي . وهذا يحدث بسبب خاصية ندين بها للأوتار ـــ خاصية الصمود السلّمي scale invariance ، وهي شيء أدخله زميل أينشتاين ، هرمان فايل H.Weyl ، ولم يطرب له أينشتاين .

## أنا على يقين من أن أينشتاين كان منزعجاً جداً .

كان منزعجاً بلا شك . وقد اتهم فايل بأنه ضلل الناس بأفكاره . والحق أن أفكار فايل قد أُدخلت في إطار فضاء زمكاني ذي أربعة أبعاد ، لا في إطار المفهوم الوتري ، لكن أينشتاين كتب إلى فايل يقول : « سأضطر إلى التنديد بأفكارك أمام الملأ » !

**إذا تبين أن النظريات الوترية الفائقة محدودة، فإنها ستفرض عندئذ نفسها فرضاً. لكن من المستحسن أن تعطي نبوءات محددة جديدة يمكن اختبارها، لاأن تقتصر على إعطاء نسخة أخرى من الفيزياء التي نعرفها. فهل هناك أمل بأن تُستنبط من هذه الأفكار الجديدة نبوءات محددة؟**

أجل. هناك نبوءات. يبدو مثلاً أن كل النظريات الوترية تقريباً تتنبأ بجسيم جديد من النوع $Z^{\circ}$.

والجسيم $Z^{\circ}$، الذي يتصرف كفوتون ثقيل، شيء عظيم إذا عرفنا كتلته. ونحن لا نعرف في الوقت الحاضر كم يجب أن تكون هذه الكتلة. لكن هب أن هذه الكتلة أمكن حسابها والتنبؤ بها ضمن النظرية الوترية ــ كما حدث من أجل الجسيم $Z^{\circ}$ قبل النظرية الوترية ــ وهذا كان كما تذكر إشارة الانطلاق في توحيد الكهرطيسية والقوى النووية الضعيفة. فالجسيم $Z^{\circ}$ الجديد سيقدم دليلاً حاسماً على التوحيد الوتري **لكل** القوى الأساسية ــ الكهرضعيفة والنووية الشديدة والثقالية.

**هل من المحتمل أن تكون هذه الكتلة من مجال طاقي يمكن بلوغه؟**

هذا ما لا نعرفه. فليس لدينا نظرية محترمة في الكتل ذات قدرة تنبؤية.

لكن يوجد، في إطار النظرية الوترية، ما ينبىء بوجود مادة مستترة ــ نوع من المادة جديد. وقد يستدعي هذا النوع حياة خاصة به.

إن ذلك في الوقت الحاضر قش في مهب الريح، ولا أحب أن أقول إنها نبوءات مؤكدة من النوع القديم الذي أنجبناه بنظرية الجسيمات W و $Z^{\circ}$ والذي اكدته تجارب كارلو روبيا C.Rubbia. ويحدونا أمل باستصدار نبوءات موثوقة وتحقيقها.

**لقد ألمحت إلى جانب ساحر من جوانب النظرية الوترية الفائقة هو فكرة وجود نسخة من العالم مصنوعة من مادة غير مادتنا. هل لك أن تشرح ذلك باختصار؟**

إنها فكرة وجود نسخة ليس لها صلة بعالمنا إلا عن طريق القوى الثقالية لا غير. ومن المدهش أن هذا العالم اللامرئي من شأنه أن يحدد أسلوب انكسار التناظر الفائق في عالمنا. ومن شأن مثل هذه النظرية أن تلقي ضوءاً على مسألة الشيء الذي يحدد بعض الفروق الكتلية في العالم المرئي.

**أي، بتعبير آخر، أن وجود ذلك العالم الآخر يتجلى عبر كتل الجسيمات العنصرية؟ وأن عالمنا يعمل الشيء نفسه بالنسبة للعالم الآخر، كتدبير تناظري، على ما أظن؟**

أظن ذلك، ولا أعتقد أن أحداً قد تكهن بالتفصيل بما ستكون عليه صورة العالم الآخر.

**لقد قلت إننا نتعامل مع العالم الآخر عن طريق الثقالة. وعلى هذا يحق لنا أن نتوقع فيه ثقباً أسود مثلاً؛ لكننا قد لا نعرف إذا كان يوجد ذرات من العالم الآخر في هذه الغرفة ــ قد يكون من شأنها أن تخترقنا كمرور الكرام فحسب؟**

إن الثقوب السوداء الكبيرة المصنوعة من تلك النسخة المادية لا يمكن استشعارها إلا عبر مفعولاتها الثقالية ــ إنها خفية كالجن في قصص ألف ليلة وليلة العربية. ومن المظنون أن للعالم اللامرئي كواركاته الشخصية المشحونة «كهربائياً»، وجسيماته W وفوتوناته الخاصة. لكن مثل هذه الفوتونات لا تجعل تلك النسخة المادية مشعة، لأنها لا تتفاعل مع شيء من أشياء العالم المرئي. لكن دعني أُلح على أن النظريات الوترية الفائقة ليست الوحيدة التي تفترض هذا النوع من العالم الثقالي غير المرئي.

**هل يوجد صلة بين الأوتار الفائقة والأوتار الكونية؟**

ربما. ويمكن الاستدلال على هذه الصلة من أن عالمنا انطلق من حجم صغير، من أوتار صغيرة، وفي أثناء انتفاخه امتطت الأوتار.

إن إدوارد ويتن قد تناول هذه الأمور أكثر من أي شخص آخر. وأحب أن أسمع رأيه فيها.

**لنعد إلى المشاكل التي تواجه نظرية الوتر الفائق. لقد ذكرت أن مسألة المحدودية ربما كانت أكثرها إلحاحاً، لأن النظرية، إذا تأكدت محدوديتها، تكون فتحاً عظيماً. فهل يوجد مسائل أو عقبات أخرى على طريق تطوير النظرية مستقبلاً؟**

حتى في حال محدودية النظرية تبقى الحسابات بواسطتها شاقة!

**ولهذا لدينا طلاب الدراسات العليا!**

لا! إن طلاب الدراسات العليا لن يحاولوا ذلك. فصياغة النظرية الوترية الفائقة في أكثر أشكالها وضوحاً تتم في عشرة أبعاد: تسعة مكانية وواحد زمني. وتبرز الصعوبة عندما نريد صياغتها في الأبعاد الزمكانية الأربعة التي نعرفها، محاولين قوقعة الأبعاد الستة الأخرى. وربما ندرِّب الحواسيب على إجراء مثل هذه الحسابات، أما طلاب الدراسات العليا فلا.

**أليس في هذا شيء من الخطأ الفادح، بخصوص نظرية يُفترض أنها «تُعلِّب» كل ما في الطبيعة من أشياء وأمور معقدة لدرجة لا تُصدَّق يتعذر معها التقدم؟ أليس المفروض في الطبيعة أن تكون بسيطة؟**

إن الطبيعة بسيطة إذا نظرنا إليها بالمنظار الصحيح. فأنا مثلاً أعتقد أن الله خلق بعدين فقط ــ واحد مكاني وواحد زماني. هل يمكن أن يوجد أبسط من ذلك؟ ثم كان بعدئذ أن حدثت نقلة طورية phase transition إلى أربعة أبعاد وستة أخرى داخلية. ففي قلب المادة بُعدان فقط بموجب هذه النظرية ولن يتغير هذا العدد إلى ثلاثة.

**هل تستطيع أن تصوغ نظرية الوتر الفائق في بعدين؟**

نعم. هنا يصبح الأمر أبسط ما يكون، كما أثبت بولياكوف Polyakov. وإليك كيف تنبعث النظرية في اعتقادي ــ في بعدين وعشرة حقول أساسية. إن العدد عشرة ضروري لاجتناب الشذوذات، فتتخلص على الأقل من أحد أنواع اللانهائيات المحتملة. وبعض هذه الحقول العشرة يمكن أن يتجلى بشكل زمكان ذي أربعة أبعاد، أما الستة الأخرى فتتقوقع كأبعاد داخلية تمثل شحنات كهربائية أو نووية. وفي هذه الصورة ذات الأبعاد الأربعة ينبثق الزمكان في أثناء هذه النقلة الطورية.

**كيف يمكن للمكان أن ينبثق من بين تلك الأعداد البعدية المختلفة؟**

إنها نقلات طورية عادية ــ إذا استطعنا تحريضها ضمن النظرية ذات البعدين. أقول «إذا» استطعنا تحريضها. لم يفعل ذلك أحد بعد. لكن هذا ما أحلم به.

**يقال إن المرور من عشرة أبعاد إلى أربعة عملية شاقة جداً، هل هذا صحيح؟**

هذا صحيح. وهنا تكمن تعقيدات هذا العالم كما تصوره النظرية الوترية.

**هل تعتقد أن صعوبات تغيير عدد الأبعاد تضاهي صعوبات البرهان على المحدودية؟**

كلا. أعتقد أن صعوبات البرهان على المحدودية ناجمة عن أن رياضيات سطوح ريمان غير مألوفة. الظاهر أن تايخمولر Teichmuller اسم كبير في هذا الميدان ــ رياضي مات في الحرب العالمية الثانية.

**لكن هذا الميدان يحتكر جيشاً من الفيزيائيين النظريين اليوم.**

ليس جيشاً. إن معظمهم مشغول بتحويل الأبعاد العشرة إلى أربعة زمكانية وستة داخلية. إنها مهمة أبسط وقد تم شق عدة طرق لإنجاز ذلك ــ لم يفرض أي منها نفسه بأناقته. أما المهمة الأصعب ــ مسألة المحدوية ــ فتتطلب مراتب حلقات أعلى في النظرية. وهذه المهمة لا تشغل عدداً كبيراً من الناس، لأنها صعبة.

**هل تستطيع أن تشرح ماهية هذه الأوتار الصغيرة؟ هل هي حلقات مغلقة أم أوتار مفتوحة؟**

إن النظرية التي تفسر الثقالة يجب أن تكون بوتر مغلق. واهتزازات هذا الوتر تقابل الجسيمات الفيزيائية. وهذه الجسيمات يجب أن تمتلك سبينات تساوي 1 أو 2 أو 3 ... والجسيمات التي سبينها 1 و 2 عديمة الكتلة وتقابل تواترات اهتزازية صفرية، في حين أن ذوات السبين الأعلى يجب أن تكون ذات كتل تساوي أضعافاً من كتلة بلانك، أي زهاء 1910 كتلة بروتونية. أما الجسيمات التي سبينها $\frac{5}{2}$ أو $\frac{7}{2}$، ... فيجب أن تكون ذات كتل تساوي وحدات كثيرة من كتلة بلانك.

**ألا يوجد مشكلات تماسك رياضي كبيرة بخصوص صياغة نظريات للجسيمات التي سبينها أكبر من 2؟**

إنها المعجزة الكبرى في هذه النظرية. إنها محدودة بسبب السبينات الأعلى فقط. والشيء الذي لا يُصدق هو أن هذه النظرية موضعية أيضاً.

**هل يصح أن نفكر بما كنا نعتبره جسيماً مفرداً أنه حلقة وترية مغلقة في الطاقة المنخفضة دون أي ارتجاج دائر في محيطها؟**

كلا. إننا لا نتكلم عن جسيم مفرد. فالوتر صورة لكل **مجموعة** الجسيمات ذات السبين الأعلى. إنها تأتي كلها معاً.

**هل يصح القول بأن هذه الحلقات الوترية ليست متحلقة في الفضاء ذي الأبعاد الثلاثة الذي نراه، لكنها متحلقة في الأبعاد الأعلى؟**

لا، لا يصح ذلك. إن الحلقة الوترية **تكون** في الأبعاد الزمكانية الأربعة، مع إمكانية التواء الأبعاد الستة الإضافية الداخلية.

**هل من الممكن أن تُظهر مسرعاتنا الحالية جسيمات ذات سبين أكبر من 2؟**

إن لها كلها كتلاً من رتبة كتلة بلانك، ولذلك لا يمكن الحصول عليها مباشرة في تجارب المستقبل المنظور.

**لكننا إذا اكتشفنا أي نوع جسيمي جديد. فإن ذلك سيكون رائعاً.**

أي نعم. سيكون رائعاً، مثلاً، إذا تنبأت النظرية بجسيم Z آخر ذي كتلة يمكن بلوغها تجريبياً. سيكون ذلك رائعاً حقاً.

**والآن. إذا حدث ذلك كله، وأصبحت نظرية الوتر الفائق النظريةَ المقبولة عموماً في المادة والقوى، فماذا بعد؟ لقد قلت إن الحسابات العملية في النظرية ذات صعوبة مخيفة، فما العمل عندئذ؟ هل نكتفي بالنظر إلى وصفاتها بإعجاب، ثم نعلقها بالجدار قائلين «إنه إنجاز عظيم»؟**

هذا ما يحدث دائماً. خذ نظرية أينشتاين الثقالية. فبعد أن تبين، من ثلاثة اختبارات شهيرة، أن نظرية أينشتاين تعمل أحسن من منافساتها، اضطررنا إلى القبول بصحتها. ولم نقم بأية حسابات لاحقة مدة طويلة، لأن الحسابات فيها كانت بالغة التعقيد.

**هل يجب أن نتوقف عند الأوتار؟ لماذا لانذهب إلى تناول درجات حرية أكثر عدداً؟ كالأغشية مثلاً.**

لدينا في الوقت الحاضر نظرية سلبية، تقول بأنك لا تستطيع أن تكتب نظرية صامدة الشكل من أجل أشياء، كالأغشية، ذات أبعاد أكثر عدداً. وعلى هذا لا ننتظر خيراً يأتي من نظرية الأغشية. إنها نوع من النظرية السلبية أنا شخصياً لا أُحبها بسبب افتراضات غير مكتوبة تُبنى ضمن براهين أمثال هذه النظريات. لكنها موجودة — كتحدٍ.

**واضح أن النظرية الوترية ذات جذور هندسية. أظن أن بالإمكان القول بأن العلم بدأ بالهندسة (إذا عدنا إلى قدماء الإغريق). وسيكون من الممتع أن نبني في نهاية المطاف كل أشياء العالم الأساسية من لبنات هندسية.**

لقد تحدثت مؤخراً مع كريستوف زيمان C.Zeeman — التوبولوجي الذي أسس مؤسسة واريك للرياضيات. فسألته كيف يميز بين الهندسة والتحليل. فقال إن لدى الرياضيين اختباراً بسيطاً. إذا رأيت رجلاً في طريقه إلى الصلع فهو رجل تحليل حتماً. أما إذا ظل ذا شعر كث فهو رجل هندسة!

**يبدو فعلاً من خلال تطور الفيزياء الجسيمية أن لابد من دراسة بنى مجردة متزايدة التعقيد وفروع رياضية متزايدة الغموض.**

أنا مسرور من أنك ذكرت هذه النقطة، لأنها من الأشياء الأخرى التي تسحرني. فقد قال ريس جوست Res Jost ذات مرة إن كل ما يحتاج الشاب أن يتعلمه من الرياضيات، بعد اختراع ميكانيك الكم، هو الأبجديتان اليونانية واللاتينية كي يملأ معادلاته بالرموز. أما الآن فقد تغير الحال! ورأينا، في السنوات الأخيرة، التوبولوجيا والهوموتوبيا homotopy والكوهومولوجيا cohomology ثم فضاءات كالابي — ياو وسطوح ريمان والفضاءات المنمَّطة — رياضيات حقيقة

ناشطة ـــ كلها تغزو الفيزياء. وكلما ازدادت معرفتنا بالرياضيات الحقيقية ازداد عمق نظرتنا إلى أمور الفيزياء.

كنت أتحدث ذات يوم مع شريكي في العمل، جون ستراثدي J.Strathdee. كنت أتعجب من الرياضيات التي علينا أن نتعلمها اليوم ـــ الرياضيات الحقيقية، لا المصطنعة. فقال: **ألا تعتقد** أنها سوف تؤذي أدمغتنا؟ ـــ كما اشتكى برتراند رسل **B.Russell**، في سيرة حياته الذاتية، من أن الانكباب المتواصل على كتاب نيوتن، **مبادئ الرياضيات**، قد أضرَّ بدماغه. وبهذه المناسبة تذكرت قصيدة ليويس كارول **L.Caroll**: **الأب الكهل ويليام**:

قال الفتى: قد صرتَ كهــلاً ياأبي
وابيضّ شعرك
مـازلتَ حتى اليوم فـوق الـرأس
رأسك تنتصب
أفــلا تـــرى هـــذا مضـــــراً
في الكهولة بالجسد

الجواب:

قد كنتُ في عهد الشباب على الدماغ
أخشى الضرر
أمـاوأن الضُـــر لـــم يحـــدث
فإني مستمر
مستمر مستمر

# 8

## شلدون غلاشو

شلدون غلاشو Sheldon Glashow أستاذ في جامعة هارفارد، وينتمي أيضاً إلى جامعة بوسطن وجامعة هوستن. أسهم إسهاماً هاماً في العديد من جوانب نظرية فيزياء الجسيمات، ونال جائزة نوبل على أعماله الأساسية في توحيد القوة الضعيفة مع القوة الكهرطيسية. وهو مهتم نشيط في التثقيف العلمي. إن غلاشو من ألدّ خصوم الأوتار الفائقة، على الصعيدين، الفلسفي والعلمي، ويقول بأنه «ينتظر انكسار الوتر الفائق».

**هل لي أن أبدأ بالتذكير بما كان يُعتقد عموماً، قبل مئة سنة، من أن الفيزياء مشرفة على نهايتها، وأن مهمتها لم تعد تقتصر إلا على وضع النقاط على الحروف، وأن هذا الاعتقاد عاد ليطفو على السطح مرة أخرى هذه الأيام؟ فبعض الناس يتحدثون عن بلوغ الفيزياء ذروتها، حول نظرية ناجزة تفسر كل شيء في الطبيعة. فهل تعتقد أن هذا أيضاً استنفار كاذب؟**

ليس صحيحاً، بالتأكيد، أن الفيزياء النظرية مشرفة على نهايتها. فلدينا اليوم، مثلاً، دفق سريع ومثير جداً من الاكتشافات فيما يسمى فيزياء المادة المكثفة. لكن ظني أنك تقصد فيزياء الجسيمات الأولية العنصرية أكثر من الفيزياء ككل. إن الفيزيائيين الجسيميين بلغوا في الوقت الحاضر مرحلة من موضوعهم مثيرة جداً لأنهم يتعاونون مع زملائهم الكونيين. فنحن نملك، لأول مرة، نظرية تتعامل مع العالَم المجهري ــ عالم الطاقات العالية والمسافات الصغيرة ــ ومع العالم الكوني أيضاً، ولادته وأصله. فهذه الوحدة الجديدة بين علم الكون وفيزياء الجسيمات العنصرية ــ التي يهتم بها خصوصاً فرميلاب الأمريكي الذي يضم فريقاً كبيراً من الفيزيائيين الفلكيين ــ تدل على بعث جديد لا على موت محتوم.

**ولكن هل الأمل في أننا قد نستطيع حقاً، وللمرة الأولى، أن نصوغ نظرية كاملة فيما يحدث**

**في الطبيعة كلها على الصعيد الأساسي ـــ نظرية في كل القوى وكل الجسيمات ـــ هو مجرد وهم خادع ؟**

إننا لا ندعي حتى الآن سوى أننا قادرون على صوغ نظرية كاملة في القوى الجسيمية العنصرية ، القوى النووية والكهرطيسية لكن بدون الثقالة . والنظرية التي حصلنا عليها مصطنعة ولغرض محدود وفيها الكثير من الغموض . فلماذا ، مثلاً ، كانت نسب كتل الجسيمات بالضبط كما هي ؟

ليس لدينا حتى الآن نظرية تضم الثقالة . وقد نكون على عتبة نظرية في هذا الشأن ، لكنها حتماً بدايات أولية جداً . ويقول أصدقائي النظريون الوتريون ، الذي يعملون ضمن الرؤية الحديثة ، بوجود نظرية موحدة وتضم الثقالة ، إنهم يحتاجون إلى عشرين عاماً لينسجوا الصلة بين عالم الثقالة وعالم فيزياء الجسيمات العنصرية .

**يبدو فعلاً أنهم واثقون من امتلاك جوهر نظرية موحدة حقاً .**

لديهم الشعور بالحاجة ، كما يقول ويتن ، إلى بناء خمسة فروع رياضية جديدة قبل أن يستوثقوا من امتلاك نظرية . الواقع أنهم ليس لديهم نظرية . لديهم خليط من الأفكار واضح أنها لا تشكل نظرية من أي نوع ولا يستطيعون حتى أن يقولوا فيما إذا كانت صنيعتهم الجديدة تصف الإنجازات الناجمة التي حصلت في المختبر وفي الفيزياء النظرية .

**ماهو ، في رأيك ، سبب تفاؤلهم ؟**

يشعرون بأن لديهم للمرة الأولى نظرية كمومية متماسكة في الثقالة ، وربما كانوا مقتنعين بأنها الوحيدة في هذا الشأن . قد يكون هذا صحيحاً وقد لا يكون . هناك احتمال بأن يكون صحيحاً ، ولديهم الآن فرصة للاعتقاد بأن حلم أينشتاين على وشك التحقيق . لكنني كنت دوماً ممن يحبون التذكير بأن أينشتاين جرى وراء هذا الحلم ، في السنين الثلاثين الأخيرة من حياته ، وبدا أنه لم يكن منتبهاً تماماً للتطورات المثيرة التي حدثت في الفيزياء النووية في تلك الحقبة .

**لقد قلت في محاضرة ذات يوم بأن الفيزيائيين يبدون منقسمين إلى معسكرين : الخيميائيين *alchimists* ولاهوتيي *theologists* القرون الوسطى . فماذا تقصد بذلك ؟**

إنني أشعر بحرج شديد من أصدقائي النظريين الوتريين ، لأنهم عاجزون عن قول أي شيء حول العالَم الفيزيائي . فبعضهم مقتنع بوحدانية النظرية وجمالها ، وإذن بصحتها ؛ وبما أنها وحيدة وصحيحة فهي تنطوي وضوحاً على أوصاف عالم الفيزياء كله . يبدو أنهم لا يرون ضرورة لإجراء أية تجربة لإثبات مثل هذه الحقيقة البيِّنة بتلقاء ذاتها ، وبذلك بدأوا يتناولون تقييم التجارب من هذه

الناحية ــ من الناحية الرياضية عالية التجريد ــ في حين أن بعض أصدقائي في بريطانيا يتناولون الفيزياء من الناحية الأخرى، الناحية التمويلية البحتة.

**وعلى هذا فأنت ترى أن التحرك باتجاه نظريات تحاول توحيد كل أمور الطبيعة بهذه الطريقة التجريدية جداً يهدد مستقبل الفيزياء فعلاً لأنه يقوّض أسباب إجراء التجارب.**

نعم، وبالطريقة نفسها التي أرى أن لاهوتيي القرون الوسطى اتبعوها لهدم العلم في أوربا آنذاك. وكان هذا، في حقيقة الأمر، السبب في أن أوربا وحدها هي التي لم تشاهد المستعر الفائق supernova الهائل الذي حدث عام ١٠٥٤، لأنهم كانوا مشغولين بالبحث عن عدد الملائكة القادرين على الرقص على رأس دبوس!

**ومع ذلك أليس من الصحيح أن في تفاصيل هذه النظريات، مهما كان رأينا فيها، شيئاً كثيراً من فيزياء هامة جداً تكمن في طاقات أعلى من تلك التي يمكن أن نأمل في تحريها مباشرة؟**

لا ندري. ليس هذا مؤكداً. فهناك من يرى أنه لا يوجد جسيمات هامة يجب اكتشافها في تلك الطاقات، بل إن هناك بيداء ليس فيها أي جسيم. وهناك نظريات أخرى تدعي أن هذه البيداء مسكونة بأشياء جديدة يجب اكتشافها. وأنا لا أعلم رأي هؤلاء الناس الوتريين، وأظن أنهم لا يعلمون ما يجب أن يعتقدوه لأنهم عاجزون عن إجراء صلة مع الطاقات المنخفضة، ولا يدرون إذا كانت هذه البيداء مزهرة أو غير مزهرة. لكن هذا قد لا يهمهم على كل حال، لأن النظرية، إذا طُوِّرت بشكل مناسب، قد تفسر الأمور مهما كانت.

**حتى ولو كان في هذه البيداء شيء يُبحث عنه، فإن فهم كل أمور الفيزياء، أي الإدراك الحقيقي لأفكار التوحيد الكامل، يستدعي الاستمرار في الذهاب إلى طاقة بلانك، نحو تلك الطاقات البالغة العظم.**

ذلك هو برنامجهم الحزبي، لكنني لا أدري إذا كان هذا البرنامج الحزبي سديداً. لأن شكل الصلة بين طاقة بلانك وفيزياء الجسيمات العنصرية لم يتحدد حقاً حتى اليوم. إنها مجرد عدد أبعاده من جنس الكتلة ويأتي من نظرية نيوتن الثقالية. سمِّها كتلة بلانك إذا شئت. وقد يكون لها دور أساسي وقد لا يكون.

**إن الإنسان يستطيع طبعاً أن يتخذ وجهة النظر المعاكسة تماماً لتلك التي دافعت عنها وأن يقول بأن هذا الاندفاع نحو التوحيد شيء جذاب جداً، جميل وملهم جداً، وأنه يمكن أن يكون حافزاً إلى إجراء تجارب إضافية في فيزياء الجسيمات بدلاً من أن يكون مثبطاً. ألا تعتقد أن هناك شيئاً بخصوص بناء نظرية كاملة عن العالم، شيئاً من شأنه أن يقنع الناس الذين سينفقون**

**على هذه الأشياء بضرورة أن يهبّوا للمساعدة في اختبار هذه الأفكار ؟**

نعم ، إذا استطاع أنصار النظرية الوترية الفائقة أن يقولوا بضرورة الذهاب إلى طاقات أعلى بشكل واقعي ، إلى طاقات نستطيع بلوغها وتقديمها . فإذا برهنوا على أننا بحاجة إلى تجارب أكون متفقاً معهم بكل قواي . لكن الحجة التي يقدمها عدد منهم ليست من هذا النوع . لكن يبدو أن العديد منهم مقتنعون ، بشكل تجريدي نوعاً ما ، بأن من الخير بناء مسرعات أضخم ، على شاكلة أن من الخير العمل على شفاء السرطان ، لكن هذا شيء لا علاقة له بما يفعلون . إنهم ليسوا قوة تدفع نحو طاقات أعلى . إن أصدقاءنا التجريبيين الذين يريدون أن يروا المزيد من هذا العالم هم القوة الضاغطة في الفيزياء ، وكان الأمر دوماً كذلك .

**ومن سيربح ؟**

أود أن آمل بفوز التجريبيين . أعتقد أن العادة القديمة في الاستعلام عن شؤون العالم بمراقبة العالم سوف تظل قائمة ، وأننا لن ننجح في حل مشاكل الفيزياء الجسيمية بالاعتماد على مقدرة الفكر وحده .

**إن إحدى المآخذ على عمل الفيزيائيين هو ما حدث مراراً أنهم أعلنوا عن «اكتشافات» لأشياء مذهلة تبين زيفها ورفضت فيما بعد . هل تظن أن التجريبيين يتهورون قليلاً في طريقة إعلان نتائجهم ؟**

إن التجريبيين كانوا دوماً كذلك . وإنني على يقين من أن عدد الاكتشافات الزائفة في الماضي يساوي ما هو عليه اليوم . والفرق الوحيد هو أنها اليوم أكثر بروزاً بقليل ، إذ لا يوجد اليوم ما يستحق الذكر من اكتشافات حقيقية مطلوبة ، على الأقل منذ خمس سنوات أو عشر . إنها ليست قضية إهمال . لكن ربما كانت مسألة الافتقار إلى الدعم المادي والمعنوي من الدول المعنية هي التي تعوق اليوم إجراء التجارب .

لقد ذكرتَ الكلفة المتزايدة للمسرعات الجديدة . صحيح أن كل مسرع جديد يكلف مالاً أكثر من سابقه ، لكننا نملك اليوم عدداً من المسرعات أقل بكثير . ففي حين أننا ، في الولايات المتحدة ، كنا نملك خلال العقود القليلة الماضية من السنين ثلاثين مسرعاً ضخماً ، لا يوجد اليوم سوى ثلاثة ؛ وتتركز مخصصاتنا المالية على عدد من المنشآت أقل فأقل . وقد نقتصر ذات يوم على منشأة عالمية واحدة ضخمة . لكن المال المصروف في هذا المجال يتناقص فعلاً في بلدي ، وأعتقد أن الأمر كذلك في أوربا . وبمرور الزمن يتناقص المال المصروف على فيزياء الجسيمات ، إذا أخذنا التضخم النقدي بعين الاعتبار . وعلى هذا بدأت المعنويات تضعف . وآمل أن يتغير الوضع

مع دخول **ليب** LEP ميدان العمل في سيرن، ومع ما نتوقع من اكتشافات مذهلة لا بدّ أن يعطينا إياها.

**لقد تعرضت أيضاً إلى النسبة العالية جداً للاكتشافات الحقيقية التي تمت في مجالات كفيزياء المادة المكثفة التي لا تستهلك إلا جزءاً ضئيلاً جداً من الميزانية. وفي بريطانيا جدل كبير حول كيفية توزيع الميزانية بين كبار مستهلكيها ـ كفيزيائيي الجسيمات والفلكيين ـ وأولئك الذين يعملون في مجالات أخرى قد تصبح أكثر نفعاً للمجتمع. فما شعورك بخصوص حصة الأسد التي تذهب إلى فيزياء الجسيمات؟ فهي برغم تناقصها ما تزال هائلة، أليس كذلك؟**

ليس من الواضح بتاتاً أن حصة الأسد من كل شيء تذهب إلى فيزياء الجسيمات. والعملية الحسابية هنا معقدة جداً. فالمال المصروف، في بلادي مثلاً، على البحوث البيولوجية أكبر بكثير مما يُصرف على الفيزياء كلها، وبزهاء عشرة أضعاف. وأنا واثق من أن الحال كذلك في بريطانيا. لكن من المحتمل أن فيزياء الجسم الصلب لا تحظى في بريطانيا بدعم مناسب، لكن الأسباب قد لا تكون تلك التي تبدو لأول وهلة. وأنا لا أعتقد أن الإنفاق في سيرن والإنفاق المساوي تقريباً في المملكة المتحدة، على بحوث الجسيمات العنصرية، يمثل عبئاً تنوء به بريطانيا. إن بريطانيا تدعي أنها لا تستطيع الإنفاق على هذا المجال. في حين أن إيطاليا قد ضاعفت ميزانية البحوث في فيزياء الجسيمات العنصرية. فهل إنكلترا أفقر وأبخل من إيطاليا لهذه الدرجة؟

**لنعد إلى الفيزياء الحالية. ما هي، في رأيك، المشاكل البارزة التي تواجه فيزيائيي الجسيمات التجريبيين هذه الأيام؟**

إنها كثيرة. إحداها المال كما ذكرنا. هناك أيضاً التسلسل الزمني لتوفر المنشآت الجديدة. فنحن، في أوربا، ننتظر انجاز المسرع **ليب**، وتسيير إجراءاته بأسرع ما يمكن أن نتوقع، لكن الآلة تستغرق قرابة عشر سنين بين التصميم الجديد ودخول ميدان العمل. وما يزال أمامنا بضع سنوات من الانتظار. ومن الصعب أن تبرر الانتظار للتجريبيين الشباب. كما أن من الصعب التأكد من أنه، عندما تعمل الآلة، سيكون هناك مجموعة من التجريبيين المتمرسين، جاهزة لإجراء تجارب على **ليب**.

وهناك مشكلة أخرى تخص حجم الفريق الذي يستغل المنشآت الجديدة. فأحد الفرق التجريبية، حول **ليب**، يضم أكثر من ٤٠٠ دكتور! فهل يمكن العمل في هذه الظروف؟ هل يستطيع فريق يضم أكثر من ٤٠٠ عضو أن يعمل كما كان يعمل فارادي قبل سنين كثيرة؟ لا أدري. إن هذا بالتأكيد أسلوب جديد. فهل تستطيع أن تميز الأذكياء منهم؟ هل يمكن حقاً

للمساهمين المتفوقين أن يتدربوا ويبرزوا من هذا الفريق علماء بحكم استحقاقهم؟ إن تجربتنا مع سيرن ما تزال إيجابية حتى الآن . والجواب ، حتى الآن وبرغم ذلك كله ، هو نعم ، آمل أن يستمر ذلك .

**إذا نظرنا إلى السنوات العشر الماضية أو نحوها في الفيزياء الجسيمية ، يبدو أنها كانت بالأحرى فقيرة بالمفاجآت المثيرة . أليس هذا دليلاً على أن الفيزياء مشرفة على نهاية طريقها ؟ فهل يجب علينا حقاً أن ننفق مزيداً من المال على البحث عن أشياء جديدة في السنين العشر القادمة ، إذا كانت الحال كذلك ؟**

أنا آمل بالتأكيد أن نستمر في التحريات . فإن كان هناك صحراء حقاً ، فإن الطريقة الوحيدة في توكيد ذلك هي أن نسير بضعة كيلو مترات أخرى على الرمل . صحيح أن الحظ لم يحالف بعدُ العديد من نبوءات وتوقعات أكثر النظريات أهمية . فنظريات التوحيد الكبير تتنبأ مثلاً بتفكك البروتون ، لكن هذا التفكك لم يُلحظ . وتتنبأ أيضاً بإمكانية وجود وحيدات قطب مغنطيسي magnetics monopoles ، لكنها لم تلحظ أيضاً حتى الآن . وبيت القصيد في هذا كله هو أن هذه النظرية بالذات تتنبأ بأن هذه الكائنات لا يمكن أن تتجلى لنا إلا في الطاقات العالية جداً . وربما كان عدم تحقق هذه النبوءات يعني أن تلك النظريات الأصلية الساذجة (أستطيع أن أقول ساذجة لأنني تعاملت معها جزئياً ذات يوم) خاطئة ، وأنه لا يوجد صحراء ، وأن هناك أشياء كثيرة مهمة ما يزال علينا استكشافها .

ومن البقايا الساحرة في موضوع الشذوذات ، مثلاً ، مسألة النترينوهات . ومن المعروف لدى الجميع أننا لا نستقبل من الشمس ما يكفي من النترينوهات لاختبار نظريتنا بخصوص هذا النجم . ونود توكيد صحتها بدراسة طيف أوسع للنترينوهات . كما نعلم أن هذا يمكن أن يتم بشكل فعال نسبياً لو كان لدينا ثلاثون طناً من الغاليوم ، مثلاً . وهذه التجربة قيد الإجراء الآن في إيطاليا والاتحاد السوفييتي . والنترينوهات الشمسية تُدرس أيضاً بطريقة أخرى في اليابان . وستخبرنا هذه التجارب عما إذا كان في نظريتنا عن الشمس خطأ فادح أو ، من جهة أخرى ، عما إذا كان للنترينوهات كتلة وأنها تعاني اهتزازاً . وهذا يمثل ، في كلتا الحالين ، تقدماً جديداً مدهشاً في فيزياء الجسيمات العنصرية .

وفي ميدان آخر تماماً ، تتزايد معلومات التجريبيين الذين يتحرون بنية الشمس . إنهم يدرسون هزاتها الزلزالية ويكتشفون أن الشمس تنتج حتماً عدداً من النترينوهات أكبر مما تتوقع أكثر النظريات سذاجة . ففي هذا الميدان يوجد إذن شيء فاسد جداً جداً . وهذا معناه أن في

الأمر مفاجأة تنتظرنا وأن الموضوع لم يُفهم جيداً.

خذ، كمثل آخر، الاكتشاف المذهل الذي حدث مؤخراً. لقد قلتَ إننا لم نصادف مفاجآت، لكننا صادفنا بعضاً منها فعلاً. لقد فوجئنا بأن معظم المادة في هذا الكون غير مرئي. وهذا ما اتضح، في السنوات الخمس أو الست الأخيرة فقط، من أرصاد الفلكيين ليزيد طينهم بلة. إنهم الملأ الذين ظنوا أنهم كانوا يدرسون مادة هذا العالم ــ مادته كلها ــ لكنهم اكتشفوا أنهم لم يكونوا يرون في الواقع من هذا العالم سوى الشوائب التي قُدِّر لها أن تُصدر ضوءاً، لأسباب غريبة. إن معظم المادة غير مرئي، فما شكل هذه المادة؟ وهذه معضلة أخرى طرحت نفسها على فيزيائيي الجسيمات والتجريبيين سواءً بسواء. قد نستطيع اكتشاف هذه المادة المجنونة في المختبر على الأرض، ومعرفة كنهها.

**وبالتطلع إلى السنوات العشر أو العشرين القادمة، وعلى فرض أن الولايات المتحدة استطاعت بناء ما تسمونه المُصادم الفائق *Super-Collider* ذا الناقلية الفائقة *Superconducting* الذي سيقدم طاقات لم يكن أحد يحلم بها قبل بضع سنوات، ما هي التجارب التي سيكون لها سبق الأفضلية؟ ما هي الأشياء التي ستُستهدف، الأشياء التي يجب البحث عنها؟**

العجيب في أمر المفاجآت أننا لا ندري بالضبط ما ستكون. وكل ما نستطيع عمله هو أن نحاول تخطيط ما يمكن تنفيذه من أكثر التجارب نتائج واتساعاً. ونحن، في الولايات المتحدة، سنكرر أولاً التجارب التي أجراها الأوربيون مرتين، ولكن في طاقة أعلى. سندرس التصادم بين البروتونات والبروتونات المضادة، وربما بين بروتونات وبروتونات، في طاقات هائلة، بالطريقة التي يتبعونها في سيرن، لكن في طاقات أعلى بزهاء مئة ضعف من طاقة مصادم سيرن. ونحن، عموماً، نتيح للبروتونات أن تصدم بروتونات مضادة تتحرك بالاتجاه المعاكس، ونُحيط منطقة التفاعل بكاشف متطور يستخدم أحدث التقانات في فيزياء الجسم الصلب. وبالمناسبة هناك مجال فائدة متبادلة بين فيزياء المادة المكثفة وفيزياء الجسيمات. ونحن نبني أحسن كاشف، وسيكلف زهاء عشرة بالمئة من كلفة المسرع نفسه، ثم نجلس ونراقب ما ينتظرنا من مفاجآت.

**لكن هناك حتماً أشياء تتوقعون رؤيتها. فما هي الأشياء التي تقودكم النظرية الشائعة إلى توقع رؤيتها، وتلك التي لا يمكن رؤيتها بالتقانة الحالية؟**

تخبرنا النظرية المعهودة بأننا سنرى أشياء معهودة. سنرى أنواعاً من النفثات وظواهر غريبة أخرى، مما كنا نراه في طاقات أخفض، ومما يُستنتج بالتعميم على طاقات أعلى. سنكون عندئذ قادرين على اختبار نظرية الكروموديناميك الكمومي ونظرية القوة الكهرضعيفة بشكل أفضل. لكن نظريتنا

المعهودة تتنبأ بنتائج معهودة . أما ما تقوله النظرية « الحقيقية » ــ النظرية التي ليست اليوم نظرية معتمدة ــ فنحن ، بكل بساطة ، لا نعرفه . ربما تظهر قوى جديدة ، ربما تظهر جسيمات جديدة ، ربما تظهر أشياء مما سماها بعضهم ومضات glints ، أو أسماء أخرى ما أنزل الله بها من سلطان أطلقها بعض زملائي النظريين . ونحن لا نستطيع أن نتنبأ بالضبط بطبيعة هذه الأشياء . وربما نقع على نفثات تنطوي على اختلال شاذ في ميزان الاندفاعات momenta . وقد نكتشف لبتونات إفرادية آتية من اصطدامات ولا نملك لها تفسيراً عقلانياً في إطار النظرية المعهودة . وربما أنتجنا جسيمات جديدة طويلة الأجل لم تكن قط جزءاً من فلسفتنا الحالية . وقد نجد شيئاً آخر لا أستطيع أن أقول عنه شيئاً لأنه سيكون ... مفاجأة . ذلك هو اسم اللعبة .

**ماذا بخصوص ما يسمى جسيم هغز ؟ إنه جسيم من المهم جداً العثور عليه ، أليس كذلك ؟**

هذا شيء عسير . قد يظهر جسيم هغز في ليب . تذكّر أن ليب آلة ضخمة لم تُستغل بعد ، إنها قيد البناء . إن لها حظاً كبيراً في العثور على جسيم هغز في مجال من الكتل المتاحة . وسيكون للمصادم الفائق الأمريكي حظ جيد في اصطياده في مجال كتلي يتيح له أن ينقسم إلى جسيمين من النوع W أو من النوع Z . نعم ، إن الحظ كبير جداً في العثور على بوزون هغز ، سواء في ليب ، إذا كان خفيفاً نسبياً ، أو في المصادم الفائق الأمريكي إذا كان ثقيلاً نسبياً . والواقع أن كتلة هذا الجسيم هي من الأشياء التي لا تتنبأ بها النظرية المعهودة .

**وماذا بشأن التناظر الفائق ؟ هل ترى أن هناك فرصة ما في أن تكتشف هذه الآلات الجديدة التناظر الفائق ؟ إنها ، بعد كل شيء ، فكرة رائعة ظلت مدار الاهتمام مدة طويلة ، لكن لا يوجد في الوقت الحاضر أي دليل على أن العالم ذو تناظر فائق . ومتى سنرى أنداداً جسيمية فائقة التناظر ؟**

إن التناظر الفائق من قبيل المهزلة . تذكر حين ظهرت ، قبل مدة غير بعيدة ، بعض الشذوذات الخطيرة في نتائج تجارب سيرن ، النتائج التي لم يمكن تفسيرها بالنظرية المعهودة ، وحين استغل بعض الناس هذه الفرصة لتفسير تلك الشذوذات بلغة التناظر الفائق . وكان أن ظهرت ثلاث نشرات لتفسيرها . وقد تبين اليوم أن تلك الشذوذات قد سُحبت وأنها لم تكن موجودة بتاتاً . وقد يحدث الشيء نفسه في طاقات أعلى . وقد تحدث في سيرن نفسه عندما نحصل على نتائج تجريبية أكثر . وعلى كل حال ، قد يتبين أن التناظر الفائق ليس ظريفاً فحسب ، بل صحيح أيضاً . ثم هناك نظرية خيالية أخرى بالألوان ، ونظريات من نوع النظريات المركّبة التي تقول بأن الكواركات مصنوعة من أشياء أخرى . وقد يتبين ، في النهاية ، أن كل هذه الأشياء صحيحة ، وبالتالي من قبيل المفاجآت .

**يوجد، إلى جانب تقنيات تصادم الجسيمات في الطاقات العالية، إمكانية لتحري ظواهر الطاقات العالية بطريقة أخرى. أقصد مثلاً تفكك البروتون أو البحث عن «المستحاثات» المتبقية منذ فجر انبثاق العالم. إنها تجارب منخفضة الطاقة وقليلة الكلفة على ما أظن، لكنها يمكن أن تتحرى ضمنياً فيزياء الطاقات العالية جداً. فهل تعتقد أن عصر هذا النوع من التجارب قد انقضى مع فشل تجارب تفكك البروتون؟**

كلا. إن التجارب التي أقيمت لتحري تفكك البروتون قليلة الكلفة نسبياً، كما تقول. وواضح أن هذه التجارب يمكن أن تتحسن إذا صرفنا عليها أكثر. وهذا هو السبب في أن اليابانيين يرغبون في بناء جهاز أضخم لرصد تفكك البروتون، أضخم باثنتين وعشرين مرة مما هو جاهز لديهم الآن. وهذه من التجارب المكلفة ــ تضاهي التجارب التي جرت على المسرعات الضخمة. وصحيح أيضاً أن الإيطاليين قد بَنَوا مختبراً ضخماً تحت الأرض لإجراء أصناف التجارب التي ذكرتها بالضبط. وبعض هذه التجارب سيكون مكلفاً جداً، خمسين مليوناً من الجنيهات أو نحوها. إنها ليست تجربة رخيصة.

**هل ترى أن هناك إمكانات أخرى لتصميم تجارب تسبر الطاقات العالية دون استخدام المسرعات؟**

أعتقد أننا بحاجة لشذرة من كل شيء. وبهذه المناسبة أذكر أن تجارب تفكك البروتون كان لها نتائج جانبية مفيدة جداً. فقد صنع اليابانيون أنبوباً كاشفاً فوتونياً قطره عشرون إنشاً لغرض إقامة تجربة لرصد تفكك البروتون، ثم اكتشفوا مبتهجين أن لهذا النوع من الكواشف سوقاً تجارية حقيقية، فاستغلوها. لكن شركة إيمي EMI في بريطانيا لم تفعل ذلك. فإذا كنت ممن لا يقيمون تجارب تفكك البروتون، فلن تحصل على أنبوب العشرين إنشاً. أعتقد أننا بحاجة لكل أنواع البحوث في هذا الاتجاه.

إننا هنا أمام نموذج من المصادفات السعيدة. فلا اليابانيون ولا الأمريكيون نجحوا في العثور على تفكك البروتون. لكنهم، بعد صنع هذه الكواشف، استطاعوا كشف النترينوهات القادمة من المستعر الفائق الجديد، فأثبتوا التكهنات النظرية للفيزيائيين الفلكيين واستنتجوا حدوداً لكتل النترينوهات. إن المفاجآت يمكن أن تأتي من كل الجهات!

ويخطر لي الآن نتيجة جانبية مفيدة أخرى. إن المصادم الفائق المزمع إقامته في بلادي سيتطلب حفر نفق طويل جداً، مما استوجب عملاً كثيراً لدينا في تقانة حفر الأنفاق، في كيفية

بناء نفق كبير بكلفة رخيصة . وبهذا النوع من التقانة قد نستطيع حفر نفق بين فرنسا وبريطانيا بنصف الكلفة .

**فكرة رائعة ! ولكن لنعد إلى موضوع الأوتار الفائقة. كيف ترى مستقبل تطور هذا الموضوع ؟**

أنا سعيد جداً بهذا العدد من زملائي الذين يعملون في النظريات الوترية ، لأن ذلك يبقيهم خارج دائرة اهتماماتي . إنني أعلم أنهم لن يتوصلوا إلى قول شيء عن العالم الفيزيائي الذي أعرفه وأحبه . وهذا جوهر السبب في أنني لا أحب هذه النظريات . لكنني أحترم أشد الاحترام أولئك الذين ، في بريطانيا والولايات المتحدة ، يعملون فيها . لكنني في الوقت نفسه أعمل كل ما بوسعي لمنع دخول هذا المرض المعدي ـــ وأكاد أقول الأكثر عدوى من مرض الإيدز ـــ إلى هارفارد . لكنني لم أنجح كثيراً حتى الآن في هذا المسعى . ومع ذلك ما يزال بعضنا في هارفارد يحاولون اتباع الطريق المستقيم الذاهب من التجربة إلى النظرية ، بدلاً من أن يلاحقوا فكرة الوتر الفائق التي تتطلب من الطاقات العالية فوق ما نحلم ببلوغه لبناء نظرية تتعامل مع العالم الأرضي الأدنى الواقع تحت أقدامنا .

**بموجب الخطوة الحالية التي تحيط بالنظريات الوترية ، هل تعتقد أن ثمة نقلة أسلوبية في الطريقة التي تُقاد فيها الفيزياء هذه الأيام ، بالمقارنة بما كانت عليه الحال قبل خمسين عاماً .**

كلا ، بتاتاً . لقد عرفت الفيزياء دوماً متعصبين مهووسين يلاحقون رؤى غريبة . أكثرهم هوساً ، وألمعهم طبعاً ، كان أينشتاين نفسه . وكثيراً ما سمعت أصدقائي النظريين الوتريين يقولون بأن الأوتار الفائقة سوف تسيطر على الفيزياء في السنين الخمسين القادمة . هذا ما قاله إدوارد ويتن . لكنني أرغب في تعديل هذه الملاحظة . أريد أن أقول إن النظرية الوترية سوف تسيطر على الفيزياء في قادمات السنين الخمسين كما سيطرت نظرية كالوزا ـــ كلاين ، تلك النظرية المهووسة الأخرى التي تعتمد عليها النظرية الوترية ، على فيزياء الجسيمات في خاليات السنين الخمسين . أي إنها لم تسيطر بتاتاً .

# 9

## رتشارد فاينمان

كان رتشارد فاينمان أستاذاً في قسم الفيزياء بمعهد كاليفورنيا التقاني. يعود إليه فضل إرساء الأسس النظرية للقسم الأكبر من فيزياء الجسيمات ونظرية الحقل الكمومية، ونال جائزة نوبل على أعماله في الإلكتروديناميك الكمومي. إن شكوكه، كواحد من «القادة الشيوخ» في الفيزياء الأساسية الحديثة، مُحْكمة بشكل خاص. توفي في أوائل عام ١٩٨٨.

**قال ستيفن هوكنغ، قبل بضع سنوات، إنه يرى أن نهاية الفيزياء النظرية قد تكون في المستقبل المنظور. أعتقد أنه كان يفكر بالنجاحات الأخيرة في السعي إلى توحيد كل الفيزياء في مخطط نظري وحيد. يبدو في هذه المقولة كثير من الاستفزاز. فما رأيك فيها، أنت الذي أنفقت قسماً عن عمرك في السعي إلى توحيد بعض فروع الفيزياء؟**

لقد أنفقت في هذا عمراً، وطالما سمعت أناساً يعتقدون أن الجواب أصبح عند ناصية الشارع. لكن الإخفاق كان نصيب هذه التكهنات مرات ومرات. منهم إيدنغتون الذي ظن، بعد نظرية الإلكترونات وميكانيك الكم، أن كل شيء سيكون بسيطاً وأن بالإمكان التنبؤ بكل شيء؛ لكن تخمينه كان خاطئاً. ومنهم أيضاً أينشتاين الذي ظن أنه يرى النظرية الموحدة عند ناصية الشارع، لكنه لم يعرف أي شيء عن نوى الذرات وكان عاجزاً بالطبع عن التكهن بشأنها. وأمامنا اليوم عدد كبير من الأشياء لم نفهمها بعد، ولا نقدرها حق قدرها، ويظن بعضهم أننا قريبون جداً من الجواب، لكنني لا أعتقد ذلك.

**هل تعتقد أن لنا بعض الحق في افتراض أن الطبيعة موحدة في أعمق مستوياتها ــ أن هناك مقولات رياضية بسيطة قادرة على «تعليب» الحقيقة الواقعية برمتها.**

لنا الحق في أن نقول في مجالنا أي شيء نريد. وهذا مجرد تخمين. فإذا ظننت أن بالإمكان تعليب كل شيء في عدد من القوانين صغير جداً، فلك أن تحاول. وليس في هذه المحاولة ما نخشاه، لأن

الخطأ يتبين لدى وضعه على محك التجربة، وهي وحدها القادرة على تبيان الخطأ. وعلى هذا لنا الحق في أن نحاول أي شيء. ولا ضير في صنع تخمين من هذا القبيل. قد يكون في ذلك خطر نفساني إذا أجهدت نفسك أكثر من اللازم في اتجاه خاطئ، لكن هذا في العادة ليس قضية صح أو خطأ. وسواء كانت الطبيعة، أم لم تكن، ذات شكل نهائي بسيط وموحد وجميل، فإن هذه المسألة ما تزال مفتوحة، ولا أريد أن أتخذ موقفاً في هذا الموضوع؛ لكنني سأتبين ذلك — وإن كنت قد لا أعيش حتى أقضي فيه. أريد أن أستنبط كل ما أستطيع بخصوص الطبيعة، لا أن أتكهن عن المستقبل. ولا فرق عندي، سواء وُجدت صيغة بسيطة أو غير بسيطة. ولكل امرئ الحق في توجيه تخميناته الوجهة التي يريد.

**إن إحدى العقبات في اختبار تلك الأفكار الحديثة تجريبياً هي أن صفاتها التي توحي بإمكانية التوحيد لا تتجلى إلا في الطاقات العالية التي تفوق إمكانياتنا. وفيما يخص المسرعات أعتقد أننا على قاب قوسين من نهاية طريق الطاقة العالية اللازمة لفيزياء الجسيمات. ومن الصعب أن يمتد نظرنا إلى أبعد من جيل التجارب القادم، لا لشيء إلا بسبب الصعاب التمويلية. فهل تعتقد، لهذه الأسباب، أن الفيزياء النظرية قد تتردى إلى درك الفلسفة؟**

قد تكون الفيزياء النظرية صائرة إلى التردي لكنني لا أدري إلى ماذا. بل دعني أقل أولاً شيئاً واحداً. لقد لاحظتُ عندما كنت أكثر شباباً أن نفراً من الكهول في هذا المجال لا يستطيعون فهم الأفكار الجديدة جيداً جداً، ويعارضونها بطريقة أو بأخرى، وأنهم كانوا ولوعين بالقول بأنها أفكار خاطئة جداً — مثل أينشتاين الذي لم يستطع هضم ميكانيك الكم. وأنا الآن كهل، وهذه أفكار جديدة، وتبدو لي مجنونة، وكأنها تسير في الطريق الخطأ. والآن أعلم أن الكهول الآخرين كانوا حمقى جداً عندما قالوا أشياء من هذا القبيل، وبالتالي، قد أكون أحمق جداً عندما أقول إن هذا سخيف. ولا بدّ أنني أحمق جداً، لأنني أشعر حقاً أن هذا سخيف. ولا أتمالك نفسي من قول ذلك، برغم علمي بالخطر الكامن في مثل هذا الرأي. وربما أكون سبباً في تهكم المؤرخين في المستقبل بقولي إنني أعتقد أن كل هذا المتاع الوتري الفائق مجنون وأنه في الطريق الخطأ.

**ما الشيء الذي لا تحبه فيه؟**

لا أُحب أنهم لا يحسبون أي شيء. لا أحب أنهم لا يمتحنون أفكارهم. لا أُحب منهم، عندما يختلفون مع التجربة في أي شيء، أن يطبخوا تفسيراً — أن يلجأوا إلى القول: « حسن، قد نكون مع ذلك على حق ». خذ مثلاً أن النظرية تتطلب عشرة أبعاد. ليكن، ربما كان ستة منها قد تقوقعت بطريقة ما. نعم، هذا ممكن رياضياً، ولكن لماذا لم تكن سبعة؟ إنهم، عندما يضعون

معادلتهم، يتركون للمعادلة اتخاذ القرار بعدد الأشياء التي تقوقعت لا للرغبة في الانسجام مع التجربة. أي، بتعبير آخر، لا يوجد أي سبب، في الوترية الفائقة، يحول دون تقوقع ثمانية من الأبعاد العشرة فلا يبقى سوى بعدين منشورين فقط، مما يخالف تماماً خبرتنا التجريبية. وهذا الاختلاف مع التجربة ضعيف الشأن جداً عندهم: لا خوف من نتائجه، ويجب غض النظر عنه دوماً. وهذا لا يبدو لي صواباً.

**هل السبب أسلوب البحث، أم أن المشكلة هي نوع الأشياء التي يحاول هؤلاء الناس فعلها؟**

لا أدري إذا كنا نستطيع أن نسميه أسلوب بحث؛ إنها مسألة وضع الأفكار على محك التجربة ومعرفة مدى الدقة في النظرية. إنها دقيقة رياضياً، لكن الرياضيات بالغة الصعوبة للأفراد الذين يمارسونها، وهم لا يستنبطون نتائجهم بإحكام. إنهم يخمنون فحسب.

**يبدو من قولك أنهم لا يأبهون بالطريقة التي يمارسونها.**

لا، إنهم لا يأبهون، لكن ذلك صعب جداً. وبذلك هم عاجزون عن صنع نبوءة دقيقة — لا بسبب اللامبالاة بل بسبب العجز. لكنهم يصرون عندئذ على القول بأنها تبدو كنظرية واعدة، برغم حقيقة أنهم يضطرون إلى تكديس كل تلك التخمينات. ربما كان هناك ستة مقوقعة من الأبعاد العشرة، وربما حدث هذا أو حدث ذاك. إن في هذه النظرية، مثلاً، عدداً كبيراً من الجسيمات، أكثر بكثير مما نشاهده. ونحن نوافقهم على القول بأن تلك التي لا نشاهدها قد تكون ذات كتلة هائلة — تلك التي تسمى كتلة بلانك — من النوع الذي يمنعنا من رؤيتها. وأن تلك التي نراها لا تتمتع بمثل تلك الكتلة الكبيرة. ولكن لماذا هذه وليس تلك؟ يجب أن يكون الجواب نتيجة للنظرية ذاتها التي يضعونها. لكنهم عاجزون عن إثبات ذلك. وبتعبير آخر، لا يوجد أية مقارنة حقيقية بالتجربة. وفوق هذا كله، فإن الجسيمات التي نراها تمتلك كتلة حقاً، لكن هذه الكتلة أصغر بكثير من كتلة بلانك — إنها من مدى التجارب الحالية. ولكن كيف يحدث ذلك، هذا السلَّم الكتلي الآخر؟ لا ندري.

وأخيراً، برغم أن أولئك الناس يقولون بأننا نفتقر إلى التجارب التي تقود خطانا، أعتقد أن ذلك غير صحيح. إن لدينا نحو أربعة وعشرين — أو أكثر، لا أعلم العدد بالضبط — عدداً غامضاً ذات صلة بالكتل. لماذا كانت كتلة الميون تساوي بالضبط 20 ضعفاً من كتلة الإلكترون، أو أية أضعاف أخرى؛ ولماذا كان لشتى الجسيمات، كالكواركات مثلاً، الكتل التي لها؟ إن كل هذه الأعداد، وما شابهها — التي يبلغ عددها قرابة دستتين — لا تجد تفسيراً في تلك النظريات الوترية — أيَّ تفسيرٍ مطلقاً! لا يوجد حالياً أي فكرة، في أي من البنى النظرية التي

سمعت عنها، تقود إلى الإجابة عن هذا السؤال: لماذا كانت هذه الكتل كما هي؟

وهكذا تراكم لدينا اليوم عدد كبير من الحقائق التجريبية لم نستطع أن نتخيل نظرية معقولة تقود إليها. من هنا يجب أن ينطلق العمل. هنا تكمن مشكلتنا الحقيقية، لأن لدينا أعداداً تجريبية يجب امتحانها بها؛ ويمكن التخلص بسهولة من أية نظرية يمكن بناؤها، وذلك بمقارنتها بالتجربة. لكن لا يوجد حتى الآن أية نظرية جيدة. فعندما تنظر إلى هذه الأعداد تبدو لك عشوائية جداً؛ إنك لا ترى فيها شيئاً منهجياً. تلك هي معضلة الفيزيائيين النظريين، ولا تملك النظريات الوترية لها أي حل.

**لدي انطباع بخصوص هذه الأنواع من المشاريع أنها تستند إلى مفاهيم فضفاضة، منها وجود قطعة من الرياضيات، أنيقة وبسيطة، تعطي كل شيء دفعة واحدة، لكنها لا تتجلى إلا في أحوال قد لا نستطيع أبداً رصدها. وبعد ذلك فقط يهتم المرء بالحد الطاقي الأدنى للنظرية ويحاول تنسيق هذه الأعداد، وهذه عملية تقنية وغير مرتبة. فهل تعتقد أن هذا النوع من النهج الفلسفي ــ فكرة مبدأ أساسي كبير يضم كل شيء ــ فيه ما يوحي بشيء جيد للفيزيائيين؟ واضح أنه يوحي فعلاً لبعض الفيزيائيين، لكن ألا يمكن أن يكون في تناول الفيزياء بهذه العقلية شيء من التضليل؟**

لقد أجبت عن هذا السؤال منذ قليل ــ لك الحق في أن تفعل ما تريد. لكن الشيء الخطير الوحيد هو أن يفعل الجميع الشيء نفسه! قد يكون هناك مبدأ موحد رائع وقد يكون الشيء الذي يتكهنون به صحيحاً. وسيكون جميلاً أن نبرهن عليه. لكن قد يكون هناك إمكانيات أخرى. فالادعاء وحده بوجود نوع من التوحيد ليس دليلاً على نوع معين من التوحيد. وهناك عدد هائل من الإمكانات، ولأي منها حظ في أن يكون صحيحاً، أو أن تكون كلها مضللة! وعلينا أن نتحرى. علينا أن نركض في كل الاتجاهات المتاحة.

**وماذا بشأن فكرة استعمال الأوتار، بدلاً من الجسيمات، كأشياء أساسية. ألا ترى هذه الفكرة ذات سمات جذابة؟**

لا بصورة خاصة. كلا، ليست المسألة مسألة فكرة أو أخرى، أو من ينجذب إلى الفكرة ــ إن المسألة هي الحصول على تشكيلة من الأفكار وأن نسير بها إلى نقطة نستطيع عندها التخلص منها بالتجارب. **لقد قال لي صديق ذات يوم ــ عندما كنا طلاباً جامعيين ــ أنا أعتقد أنني** فهمت أن المسألة في الفيزياء النظرية هي أن تبرهن، بأسرع ما يمكن، على أنك كنت مخطئاً!» وما يفعله الوتريون الآن هو أنهم لا يبرهنون على أنهم مخطئون، لأنهم يمنحون أنفسهم حريات

التصرف بمعادلاتهم قائلين: «ليكن، قد يتقوقع ستة من الأبعاد العشرة ويبقى لنا أربعة»، دون أن يثبتوا أن ستة قد تقوقعت، دون أن يفحصوا لماذا لم يتقوقع سبعة. إنهم لا يمتحنون الأفكار بالتجربة بما يكفي من الحزم، بسبب صعوبة حساب أي شيء. هذا يعني أنهم معلقون في الفراغ وليس عليَّ أن آبه لهم كثيراً!

**يعتقد بعض العاملين في الأوتار الفائقة أن أحد الأسباب الرئيسية في دراستها هي أنها تعِد بالتخلص من اللانهائيات التي أنْقَضَتْ ظَهْر الفيزياء الأساسية منذ عشرات السنين. لقد كان من حقي أن أظن أنك ربما رحبت بهذه النظريات التي تحل مسألة اللانهائيات دفعة واحدة وإلى الأبد.**

إننا نرحب بالشيء ولا نرحب به، بمقدار ما يتفق مع ظواهر الطبيعة. وسنبتهج طبعاً إذا كانت الوترية الفائقة تزيل اللانهائيات فعلاً. لكن شعوري كان دوماً — وقد أكون مخطئاً — أن هناك حتماً أكثر من طريق للذهاب إلى الطاحون. ولا أعتقد أن هناك وسيلة واحدة فقط للتخلص من اللانهائيات. ولا أعتقد بمقولة أن تحاشي اللانهائيات يقود إلى تلك النظرية الوترية وحدها. إن من شأنه أن يقودنا في كل الاتجاهات. ولما كان خيال الانسان واسعاً جداً، فإنه سيجد طرائق عديدة أخرى لاجتناب اللانهائيات، وقد تكون إحداها النظرية الصائبة. فاجتناب اللانهائيات في نظرية ما ليس، بالنسبة لي، سبباً كافياً للاعتقاد بوحدانيتها. هذا رأيي، وقد يكون غير صائب كما شرحت لك — أنا رجل كهل. وربما كان أولئك الشباب يدركون أحسن مني أن لا وجود لطريقة أخرى في سبيل ذلك. ولو كنتُ درست الموضوع بشكل أحسن ربما أدركتُ أيضاً لماذا يجب سلوك هذا الطريق. وبرغم ذلك لا أراه صواباً.

**لكن التخلص من هذه اللانهائيات كان من الصعوبة بمكان. وإذا تبين فعلاً أن الوترية الفائقة نظرية غير لانهائية حقاً، سيكون ذلك سبباً جذاباً جداً لاعتناقها.**

نعم، لو اتفقت أيضاً مع التجربة. لكن ما يقولونه هو: «لنفترض أننا نقبل بعدم وجود طريقة للخلاص من اللانهائيات وأننا اكتشفنا بعدئذ فجأة طريقة للتخلص من اللانهائيات دون أن يتاح استخلاص نتائجها. وبما أن ذلك ضروري، فلا بدّ أن تكون النظرية الصحيحة». ثم تجلس قائلاً: «أرأيتم! إنكم لا تستطيعون دحضها». الذي أفهمه هو أنك شرحت لي كل ما يقوله هؤلاء الناس وكيف يستطيعون قول كل تلك الأشياء عندما لا أفهمها. إنهم لا يستنتجون أي شيء، بل يقولون فقط إنه، مادام النموذَج الوحيد الذي يستطيعون صنعه والذي لا يمكن دحضه، يجب أن يكون صحيحاً. حسن. قد يكون هذا ما حملهم عليه. قد يكونون على حق. لكنني لا أعتقد ذلك!

**لو ألقينا نظرة إلى الوراء، حين كنتم تطورون الإلكتروديناميك الكمومي، نرى أن اللانهائيات كانت مشكلة آنئذ. ويمكن أن نقول إن هذه المشكلة قد ابتعدت لأنكم تدبرتم صعوباتكم مع هذه اللانهائيات بأن صورتموها وأزحتموها جانباً، إذا جاز هذا القول.**

نعم، بالضبط. هذا ما حصل تماماً.

**وبذلك أثقلت هذه اللانهائيات كاهل نظرية الحقل الكمومية لأكثر من جيل. فهل تعتقد أنه ما يزال جائزاً لنظرية أساسية في شتى التفاعلات الجسيمية أن تحوي هذه اللانهائيات؟ أم أنك تعتقد أن ديراك كان على حق حين قال إنه لا يستطيع اعتناق أية نظرية تحوي هذه اللانهائيات؟**

لا شك أن التجارب ليس فيها لا نهائيات ــ إن كتلة الإلكترون ليست لا نهائية. وعندما نعتمد الالكتروديناميك بالمعنى الشائع، دون أن نضيف كل التعديلات الجديدة، نكتب المعادلة ثم نحسب الكتلة في الإلكترون ونجدها لا نهائية. عندئذ نلجأ إلى ممارسة لعبة من نوع الغميضى ونقول إن تلك ليست الطريقة التي يُفترض أن نتبعها لحساب الكتلة. بل يُفترض أن نطرح شيئاً من شيء وأن نفعل هذا وذاك؛ وهذه القواعد التي ندعوها قواعد «إعادة الاستنظام renormalisation» تعطي النظرية التي كل الأجوبة فيها منتهية، محدودة، ومتفقة مع التجربة. تلك هي حالنا. لكننا لا نعلم إذا كان هذا الشكل المعاد تنظيمه معقولاً على صعيد الرياضيات. إن المهم جداً هنا هو أننا، في كل هذه السنين، لم نبرهن قط بطريقة أو بأخرى إذا كان هذا الشكل معقولاً أم لا. لكن لنفترض أنه تبين معقولاً. عندئذ يصبح لدينا بنية رياضية هي «اكتب هذه المعادلات الخاطئة»، أي، عندما تحصل على لانهائيات، إلعب لعبة الطرح، تلك التي اخترعها ثلاثة رجال عام ١٩٤٧، ثم احسب النهاية الحدية وأخرجها، وبذلك تحصل على نظرية غير لانهائية، وتكون تلك الأجوبة المطلوبة. هذه هي البنية الرياضية، برغم ما فيها من عيوب. على أن من الممكن أن يُعثر ذات يوم، على يدي امرئ يعمل بعناية أكبر وبطريقة أخرى، على مجموعة معادلات نظيفة من اللانهائيات وتقود إلى النتائج نفسها، لا أقصد بذلك فيزياء جديدة، بل بالأحرى تنظيماً جديداً لما نفعله في سبيل إجراء حسابات تكتب بشكل أقل إرباكاً.

في هذه الحالة تبدو القضية قضية تقانة رياضية لا غير. ولكن من الممكن أيضاً أن يكون الإلكتروديناميك نظرية غير متماسكة، مما يجعل المشكلة من الزاوية الفيزيائية أخطر بكثير. وإذا لم يكن لدينا نظرية متماسكة رياضياً، يصبح علينا أن نعلم عن الطبيعة أكثر مما نعلم وأن نجد التعديلات الواجب إدخالها على الإلكتروديناميك. ونحن نملك فعلاً بعض الدلائل على هذا التشعب الثنائي. فلدينا فيما يسمى «الكروموديناميك الكمومي»، الذي يحوي كواركات

وغليونات ويُفترض أنه يفسر خواص البروتونات وما إلى ذلك، نظرية تستطيع إثبات تماسكها الرياضي. ولها لانهائيات يمكن أيضاً كنسها إلى تحت البساط بالطريقة المعهودة. لكن النتيجة النهائية معروفة بتماسكها الرياضي. فلا بدّ أن يكون من الممكن معرفة النتيجة دون المرور باللانهائيات. وعلى هذا أعتقد أن تلك اللانهائيات قضية تقنية نوعاً ما. فنحن نصوغ النظرية بشكل غير صحيح عندما نكتبها أول مرة.

**من المقبول طبعاً افتراض أن مسألة اللانهائيات لن تُحل إلا في إطار توحيد القوى المختلفة.**

نعم؛ فبسبب الحل الظاهري، في حال الكروموديناميك الكمومي، وعلى فرض أن الإلكتروديناميك يمكن أن يُبرهن على عدم صحته، عندئذ يكون عليه، كي يصبح مرضياً، أن يشكل جزءاً من نظرية مشابهة. وهذا يعني حتماً تبني نوع من التوسع ومزيد من التناظر مع كل أنواع القوى المختلفة المحتواة في الصرة نفسها. تلك واحدة من الأفكار التي أوحت بنظريات التوحيد. وهذا إيحاء فعال. ويجب أن أعترف صراحة أنني لم أفكر قط بأن محاولة التخلص من اللانهائيات ستكون طريقة جيدة لاكتشاف قوانين فيزيائية صحيحة، وكنت مخطئاً. وكثيراً ما أخطأتُ في تخمين أحسن الطرائق في العمل.

عندما كنت تسألني في البدء عن رأيي في تلك الأوتار الفائقة، كان تواضعي نابعاً من خبرتي. فأنا لا أستطيع تأكيد أي شيء — إنني لا أعتقد بها وحسب. لقد اعتقدتُ قبل الآن، بخصوص بعض النظريات، أنها ستكون بلا جدوى، ثم تبين أنها جيدة. فأنا قد أخطأت قبل اليوم.

**صحيح أن المشكلة العويصة حقاً بخصوص اللانهائيات هي الثقالة. ويبدو من غير الممكن، في أية نظرية توحد القوى الأساسية، أن نتحاشى ما تؤديه الثقالة من دور مركزي. وقد يبدو غريباً لبعض الناس أن تتدخل الثقالة دوماً في فيزياء الجسيمات وهي على هذا الضعف كقوة في المستوى الذري. هل يوجد طريقة بسيطة تبرر، في رأيك، دخول الثقالة في هذه الشؤون؟**

يدهشني أن أسمعك تظن أن الثقالة قد لا تكون مهمة. إنها أحد قوانين الفيزياء! ومعلوم أن الكتل العديدة المتجمعة معاً تتجاذب فيما بينها. فإذا كان علينا الحصول على نظرية في عالم الفيزياء ولم نستطع معرفة سبب انجذاب الكتل بعضاً إلى بعض نكون قد أخفقنا في توصيف العالم بشكل صحيح! وعلى هذا يجب أن تبرز الثقالة من القوانين التي نقترحها مهما كلف الأمر.

**لكن هل تعتقد أن الثقالة ضرورية لتدبير فيزياء الجسيمات؟**

تدبيرها بهدف ماذا؟

**حل مسألة اللانهائيات.**

أوه، ليس لدي فكرة. هذا ممكن، لكن سبب حاجتنا إلى الثقالة هو أن الثقالة موجودة. وعلينا الحصول على نظرية تفسر ما نراه. تلك هي ضرورة الحصول على الثقالة، وليس مهماً أن نحتاجها للتخلص من بعض اللانهائيات. والمسألة الثانية هي معرفة ما إذا كان على الثقالة أن تكون نظرية ميكانيكية كمومية، على غرار الظواهر المكيانيكية الكمومية التي تنشأ مع الجسيمات الأخرى. ولا يبدو معقولاً أن نعثر على عالم تقليدي جزئياً وكمومي جزئياً. وعلى هذا، مثلاً، فإن عجزنا عن أن نرصد الموقع والاندفاع في آن واحد وبالدقة التي نريد ــ وهذا ما نعلمه من ميكانيك الكم ــ يجب أن ينطبق على الثقالة أيضاً. أي أننا يجب أن نكون عاجزين عن استخدام القوى الثقالية لتعيين موقع الجسيم واندفاعه بأحسن من دقة معينة، لأن قبول العكس يقودنا إلى تناقض. ولدى محاولة تعديل الثقالة بهدف إدخالها في نظرية كمومية نكتشف اللانهائيات، كما يحدث في الإلكتروديناميك تماماً، لكن عملية تكنيسها لإخفائها تحت البساط أصعب بكثير. إنها أخطر بكثير. وأنا لا أعلم كيف تتلاءم الثقالة ضمن هذه الأشياء، لكنها يجب أن تتلاءم. وهي، بالإضافة إلى اللانهائيات، تثير عدداً كبيراً جداً من المشاكل.

يوجد في نظريات الحقل الكمومية طاقة ذات صلة بما نسميه خلاءً بلغ فيه كل شيء مستواه الطاقي الأدنى وهذه الطاقة ليست معدومة ــ بموجب النظرية. ويُفترض في الثقالة أن تتفاعل مع كل شكل من أشكال الطاقة، ومن ثم مع طاقة الخلاء هذه. وعلى هذا ــ إفهم ذلك كيف شئت ــ يجب أن يكون للخلاء وزن ــ الكتلة المكافئة للطاقة ــ ولا بدّ أن يولِّد حقلاً ثقالياً. لكنه لا يفعل! والحقل الثقالي الناجم عن طاقة الحقل الكهرطيسي في الخلاء ــ حيث لا ضوء ولا شيء، كل شيء هادئ ــ يجب أن يكون هائلاً، هائلاً جداً، بحيث يكون واضحاً. لكن الواقع أنه معدوم! أو أنه ضعيف لدرجة أن يتعارض تماماً مع ما نتوقعه من نظرية الحقل. تُدعى هذه المسألة أحياناً مسألة الثابتة الكونية؛ وهي توحي بأننا نفتقد شيئاً في صياغتنا لنظرية الثقالة. حتى إن سبب الداء ــ اللانهائيات ــ قد يكون ناشئاً عن تفاعل الثقالة مع طاقتها الخاصة في الخلاء. فنقطة الانطلاق هي الخطأ لأننا نعلم سلفاً بوجود شيء خاطئ في فكرة أن الثقالة يجب أن تتفاعل مع طاقة الخلاء. وعلى هذا أرى أن أول ما يجب أن نفهمه هو كيفية صوغ الثقالة بما يضمن أن لا تتفاعل مع الطاقة في خلاء. أو ربما نحتاج إلى صوغ نظريات الحقل بما يضمن، قبل كل شيء، أن لا توجد أية طاقة في خلاء. وبتعبير آخر، هناك أسرار ذات صلة بمسألة استكمام الثقالة وهي أخطر من اللانهائيات. فالداء ذو صلة بصياغة النظرية، بالدرجة الأولى.

**يوجد أيضاً قضايا تتعلق بالمفاهيم . فأنت إذا طبقت ميكانيك الكم على الثقالة تكون ، بمعنى ما ، قد طبقت ميكانيك الكم على المكان والزمان . ونحن ، إذا اعتمدنا الزمكان بمجمله ، نكون قد اعتمدنا العالم كله . ومن الشائع هذه الأيام الحديث عن علم الكون الكمومي الذي يسعى إلى تطبيق قوانين ميكانيك الكم على صورة مبسطة للعالم ككل . فهل تعتقد أن تلك الانعكاسات المفهومية أساسية حقاً ، أم أنها مجرد مصادفة ؟ أو ، بتعبير آخر ، هل يجب علينا حقاً أن نفهم ما نعنيه بعبارة تابع الموجة ( الميكانيكي الكمومي ) قبل أن نستطيع إحراز تقدم في استكمام الثقالة ؟**

فقط بعد أن نحرز تقدماً سوف نعلم ما يجب علينا أن نفهمه وما هو غير ضروري من مفاهيمنا . ليس من السهل أن نستبق الزمن .

**إن عدة أناس ، ممن يعملون في هذا الميدان ، يعتنقون ما يسمى « التفسير العديد العوالم » لميكانيك الكم . ما شعورك تجاه هذا التفسير ؟**

لا أدري . أنت تعلم أننا في هذا الميدان نتفوق كثيراً على سوانا في ميادين أخرى لأننا نمتحن أفكارنا بالتجربة . فلا أهمية إذن لما تعتقده ، اللهم إلا نفسانياً . فإذا قلتَ « إن اللانهائيات مستحيلة ؛ سيترتب عليّ أن أصنع نظرية جديدة من هذا النوع » عندئذ قد تكون مخطئاً تماماً ؛ لكنك تحاول أن تصنع نظرية جديدة وتتفق مع التجربة حتى برغم أن الفكرة التي دعتك إلى التفكير بالشيء الجديد قد لا تكون صحيحة . واتفاق النظرية الجديدة مع التجربة شيء جيد ، وتكون قد اكتشفت شيئاً . إن هذه الأفكار المتقدمة زمنياً بخصوص ما هو متماسك فلسفياً وما هو ضروري فلسفياً هي دوافع نفسانية تقول « لا أستطيع اعتناق نظرية اليوم لأنها كذا وكذا ، وعلي أن أهجرها وأن أحاول العثور على شيء آخر » . تماماً كما قلتُ عندما كنت شاباً بأنني لا يمكن أن أعتقد أن الإلكترون يؤثر في نفسه ، وعليّ أن أجد شيئاً آخر . ثم انطلقت ؛ لم أجد الشيء الصحيح ، لكنني ربما استطعت . وهذا لا يعني أن الالكترونات لا تؤثر في نفسها ؛ بل كل ما هنالك أن الفكرة كانت دافعاً نفسانياً مفيداً لصنع نظرية جديدة .

وعلى هذا لا أعارض ولا أتجادل مع أولئك الذين يصرون على أن هذا أو ذاك مستحيل وأن ذلك يجب أن يكون كذا وكذا . وسأستمر في محاولة إيجاد نظرية لها هذه الخاصية الجديدة ، لأن تلك النظرية قد تكون صحيحة . أفهمت ؟ أنا لا أريد أن أتكبل بهذه الشراك ، لأنني لا أريد أن أعارض أية فكرة معقولة تخطر للناس بخصوص كيفية وجوب سير الأشياء ، لأن ذلك ربما جعلهم يفكرون بشيء يفي بالغرض . وليس من الضروري أن يكون صحيحاً ، بل فقط أن يجعلهم يفكرون بشيء يفي بالغرض .

**أنت إذن تتخذ من هذه الأمور موقفاً ذرائعياً *pragmatic*(*) ؟**

نعم ، أظن أنك يمكن أن تسميه ذرائعياً ، بمعنى أن كل ما أهتم به هو السعي للعثور على مجموعة قواعد تتفق مع سلوك الطبيعة ، لا أن أحاول الذهاب إلى أبعد من ذلك بكثير . ولئن كنت أرى أن معظم المناقشات الفلسفية مفيدة على الصعيد النفساني إلا أنك إذا تطلعت ، في النتيجة ، إلى ما قيل في الماضي، وقيل بكل حزم، ترى أن كله تقريباً كان دوماً ــ إلى حد ما ــ هراءً !

**أنا على يقين من أن كثيرين يشاطرونك هذا الرأي ! ولكن هب أن الأمور سارت كما يرى المتفائلون ، أي أن الأوتار الفائقة أثبتت جدارتها بعد بضع سنوات وأن الصعوبات التي ذكرتها قد حُلّت ؛ ففي أي حال تصبح الفيزياء النظرية عندئذ ؟ سيكون لدينا حتماً نظرية قادرة على تفسير كل ما يواجهها من أحداث في العالم . فهل تعتقد ذلك حقاً ؟ هل ترى أن النظرية التي تحسن التعامل مع عناصر العالم الأساسية قادرة ، مبدئياً ، على حل كل شيء ــ كمسألة أصل الحياة وأصل الوعي مثلاً ؟**

إنه سؤال كبير . لقد قلتَ أشياء كثيرة وعلي أن أعود إليها . دعنا نبدأ بمسألة الفيزياء . من المؤكد تماماً أننا يمكن أن نحصل ذات يوم ، وربما من الأوتار الفائقة ، على نظرية قادرة على تفسير كل مشاهداتنا ؛ وأننا ، بتحليل الفرضيات النظرية تحليلاً رياضياً جيداً ، سنبرهن على أن نسبة كتلتي الميون والإلكترون هي بالضبط النسبة المقيسة ، وأن كل ذلك العتاد الآخر يعمل كما يرام ؛ وأن النظرية تتنبأ صادقة بكل مظاهر الطبيعة ، وربما تنطوي على أحسن وصف لأصل هذا العالم . لنقبل هذا كله . إن كل هذه المسائل من صلب النظرية الأساسية . لكن في العالم الواقعي أمواجاً تضرب السدود ، وعواصف وبروقاً ورياحاً وضجيجاً وما إلى ذلك ، وهي حوادث لا نستطيع تحليلها مباشرة ، حتى ولو كنا نعرف كل قوانين الفيزياء ، والواقع أننا نعرف اليوم من قوانين الفيزياء ما يكفي لنستطيع ، مبدئياً ، تحليل الأمواج التي تضرب السدود ، والبرق وكل شيء آخر . لكن تفاصيل فعل الرياح والمياه ... معقدة ــ يصعب علينا تحليلها بدقة .

**هل السبب كثرة العوامل فقط أم أن هناك سمات أساسية جديدة يمكن أن تظهر ؟**

الظاهر أن فهم كل أنواع هذه الحوادث لا يتطلب أياً من فروع الفيزياء المتقدمة التي تكلمنا عنها . إن قوانين ميكانيك الكم والذرات وما إلى ذلك ، ودون حاجة إلى إشراك النوى الذرية ، كافية لشرح الظروف الجوية ــ رغم أننا لا نستطيع تفسيرها لكثرة عواملها . ومن عادتي أن أشبهها بلعبة

---

(*) موقف من يرى أن صحة الآراء تقاس بمدى نجاحها العملي . (المترجم)

الشطرنج : فالإنسان يستطيع أن يتعلم كل قواعد الشطرنج ، لكن هذا لا يكفي كي يلعب جيداً ، وكذلك يستطيع أن يتعلم كل قواعد الفيزياء ؛ والواقع أننا نعرفها بدقة كافية فيما يخص الظواهر العادية على الأرض ، وفي الظروف العادية نحن نعرفها جيداً . لكن هذا لا يعني أننا نستطيع تحليل كل شيء . والواقع أن الظواهر الطبيعية متداخلة العوامل لدرجة نعجز عن تحليلها تحليلاً جيداً . وأنا أعتقد أن أصل الحياة واحد من تلك الظواهر المعقدة . والفيزياء ساعدت في فهم ما يمكن أن تفعله الجزيئات . وقد حصل هذا التقدم منذ حين . وما نحاول عمله اليوم على صعيد القوانين الأساسية أوثق صلة بتاريخ هذا العالم وبالفهم الإدراكي الكامل لكل قاعدة أساسية . ووضعنا الحالي في الفيزياء يشبه وضع من يعرف الشطرنج ، لكنه يجهل منه قاعدة أو اثنتين . لكن هذا العدد الضئيل من القواعد المجهولة ليس ذا فعالية كبيرة في الأمور التي تحدث في هذا الجزء من الرقعة حيث تجري الأمور ، ونستطيع تدبير شؤوننا بشكل جيد إلى حدٍ ما دون أن نفهم تلك القواعد المتبقية . وأستطيع أن أقول إن هذا هو المنوال فيما يتعلق بظاهرتي الحياة والوعي وما إلى ذلك . والسؤال عن طريقة حل هذه المسائل وعن الكيفية الفلسفية لحلها سؤال يستدعي التدقيق . لكن الإدراك الكامل لكل القوانين الأساسية ليس من المهام الملحة اليوم لدى الفيزيائيين . فنحن نعرف القوانين التي تحكم الذرات ، هذه الكائنات التي تصنع الحياة في ظروف معينة على سطح الأرض .

**لكن هناك بالطبع أناساً يدّعون أن مبادئ جديدة سوف تخرج من خلال دراسة المنظومات المعقدة، وأن هذه المبادئ قد تكون بسيطة بعض الشيء في أسلوب عملها، لكنها ليست محتواة، ولو مبدئياً، في الفيزياء الأساسية العميقة.**

كل شيء صحيح إلا مقولتك الأخيرة . يمكن للناس أن يقولوا ذلك ، لكنني لا أرى سبباً يدعو للاعتقاد به . ومن المؤكد أن الأشياء عندما تصبح معقدة نستخدم مبادئ جديدة تساعدنا في تحليلها . ففي الشطرنج ، مثلاً ، يصبح موقف اللاعب أقوى عندما يدفع بأحجار اللعب إلى مركز الحلبة . وهذا مبدأ غير موجود بشكل مكشوف عندما تقرأ قواعد الشطرنج ، ولكنك يمكن أن تدركه بأسلوب غير مباشر من خلال الممارسة الطويلة لقواعد اللعبة . وواضح أن هذا المبدأ ينتج من قواعد اللعبة فقط ، لا من أي شيء آخر . نعم ، هناك حقاً مبادئ رائعة ، أفكار في التكافؤ الكيميائي والصوت والضغط ومبادئ أخرى تنظيمية عديدة ، تساعد في فهم ظرف معقد . لكن الادعاء بأنها غير محتواة في القوانين الأساسية مقولة تدل على سوء فهم . إن القوانين الأساسية تنطوي في أحشائها على كل شيء . وتقتصر المهمة على إيجاد الطرائق المناسبة لتحليل المنظومات المعقدة .

**نعم، وأنا لا أقصد أن أقول إن هذه المبادئ الجديدة قد تتعارض مع القوانين العميقة، بل فقط أن هذه القوانين غير مناسبة لامتصاص تلك المبادئ.**

لا أعلم ما يعني ذلك.

**يعني، مثلاً، أن المبادئ يمكن أن تتناول تفاصيل بخصوص قيود المنظومة، بخصوص حالاتها الفعلية، مما لا يكون موجوداً في القوانين الأساسية نفسها.**

لا أدري. لا أعتقد ذلك. هناك عدة مشابهات يمكن ذكرها، كما في تحليل الحواسيب (الكمبيوترات). تجد أنك، إذا كانت لديك أنواع من العناصر مثل البوابات NAND gates، تستطيع ضمها معاً لصنع أي حاسوب. لكن في قمة ذلك الفكرة العظيمة، فكرة تلك المفاهيم، كالمعالج المركزي central processor وقسم الذاكرة، الخ، المخترعة لفهم الحاسوب. ورغم أن كل هذه الأجزاء يمكن أن تُصنع من تلك البوابات، فإن من المفيد جداً أن نمتلك تلك المبادئ العليا. وفي حال أشياء كالريح يكون من الأجدى أن نعلم ما يحدث عندما يتحرك عدد كبير من الجزيئات باتجاه واحد تقريباً، بدلاً من أن نحاول معرفة الحركة الدقيقة لكل جزيء من خلال أحكام القوانين. ويمكن أن نمثل الحركة الجماعية بسرعة وسطية وما شابه ذلك وأن نكوِّن فكرة عن الريح، فكرة لا توجد في القوانين بشكل مكشوف. فكلمة «ريح» غير موجودة في القوانين الأساسية، لكن القوانين الأساسية تنطوي على مفهوم الريح. وذلك هو الواقع، في رأيي.

**حسناً، إن الشيء الذي كان في ذهني هو العلاقة بين الفيزياء وعلم الكون. فبالرغم من أننا ربما نكون قد فهمنا كيف توسع العالم في الانفجار الأعظم، لا يبدو أن قوانين الفيزياء تنطوي على كيفية انبثاق العالم. وعلى المرء أن يضع شروطاً بدئية خاصة، فهل تعتقد أننا نستطيع فهم العالم بمجمله باستخدام الفيزياء، أم أن هناك حاجة لمبادئ إضافية؟**

هذا سؤال مهم جداً لأن الفيزياء ما زال لها، حتى اليوم، الخاصية التالية: مجموعة من القوانين تتيح لك، إذا عرفت الظروف الراهنة، أن تعلم ما يحدث بعدها؛ أي، بتعبير آخر، إذا وضعت ثلاث ذرات من هذا النوع هنا، وخمس ذرات من ذلك النوع هناك، تستطيع أن تعلم ما يحدث لها بعدئذ. فالواقع أن هذه القوانين تتصف بأنها لا تتعلق بالزمن المطلق؛ إنها هي نفسها اليوم وغداً. ليس للفيزياء تاريخ يحكي كيفية نشوء قوانينها. إنها ليست بذات تطور داخلي. إن قوانين نيوتن، مثلاً، بما فيها قانون التربيع العكسي في الثقالة، لا تقول أي شيء بخصوص متى يُفترض أن تُجرى القياسات أو كيف اكتسبت كينونتها في الزمان. وكذلك حال قوانين الكهرطيسية وميكانيك الكم وسواهما. أود أن أقول إنها موضعية في الزمان؛ إنك تستطيع تطبيقها في أي

حين . فلا يمكن أن تُطبق إذن على علم الكون ، لأن علم الكون يحتاج إلى شيء إضافي : كيف انطلقت الأشياء؟ عندئذ فقط يمكنك أن تشيد هذا العلم .

والآن ، ربما كانت تلك الأنواع من القوانين الفيزيائية ناقصة . وقد يكون أن القوانين تتغير بشكل مطلق بمرور الزمن ؛ أي أن الثقالة مثلاً تتغير مع الزمن وأن قانون التربيع العكسي ذو شدة تتعلق بطول عمره منذ بدء الزمن . وبتعبير آخر ، من الممكن أن نفهم في المستقبل كل شيء بشكل أحسن وأن تكتمل الفيزياء بنوع من المقولات بخصوص كيفية انطلاق الأشياء ، وذلك بمعزل عن قوانين الفيزياء .

**أنت إذن لا تتفق مع جون ويلر *J.Wheeler* الذي يرى أن قوانين الفيزياء قادرة على إخراج العالم إلى الوجود ؟ بل ترى أننا بحاجة إلى شيء يفوق تلك القوانين ويبزها ؟**

عليك أن تلتزم الحذر بخصوص ما يقوله جون ويلر ، لأنني أمام هذا القول لا أدري إذا كان يعني أن قوانين الفيزياء **يجب أن** ، أم أن قوانين الفيزياء **تفعل** . ففي الوقت الحاضر قوانين الفيزياء **لا** تفعل . وأنا على يقين من أن ويلر نفسه يتفق معي على أن قوانين الفيزياء المعروفة حتى اليوم لا تخبرنا عن كيفية بدء الأشياء ــ لا تستطيع بسبب طريقة كتابتها . أنا أعرف ويلر ، وأظن أنه يقصد على الأرجح أن قوانين الفيزياء **سوف** تفعل إذا فُهمت بشكل كامل . نعم ، هذا ممكن تماماً . وهذا ما أقوله أيضاً ؛ ربما لا تصبح قوانين الفيزياء المستقبلية ، عندما يكتمل شكلها ، من النوع الذي يمكن أن يعمل في أي وقت ، بل تصبح منطوية على كل تاريخ العالم دونما حاجة إلى أية فكرة خارجية ــ بخصوص كيفية انطلاق الأشياء مثلاً . لكن الحال ليست كذلك في الوقت الحاضر .

**كيف تفكر في قوانين الفيزياء إذن ؟ هل تفكر فيها بنوع من الطريقة الأفلاطونية على أساس أنها موجودة بشكل مستقل عن العالم ، أي أن لها وجوداً بحد ذاتها ؟**

هل تسأل عن حاضرها أم عن مستقبلها ؟

**عن الاثنين .**

لنتكلم عن الحاضر ، موافق ؟

**موافق**

إن مسألة الوجود مسألة جد مهمة وصعبة . إنك إذا مارست الرياضيات ، وهو علم يجد بسهولة نتائج الافتراضات ، تكتشف مثلاً ــ وهذا اقتراح بسيط طبعاً ــ شيئاً غريباً إذا جمعت مكعبات الأعداد الصحيحة . مكعب الواحد واحد ، مكعب الاثنين هو ضعفا ضعفي الاثنين ،

أي ثمانية ، ومكعب الثلاثة هو ثلاثة أضعاف من ثلاثة أضعاف الثلاثة ، أي سبعة وعشرون . إذا جمعت مكعبات الأعداد الصحيحة المتوالية ، واحداً مع ثمانية مع سبعة وعشرين وهكذا ، وتوقفت عند حد ما ـــ لنتوقف عند ثلاثة ـــ تجد ستة وثلاثين . وهذا مربع عدد آخر ، ستة ، هو مجموع تلك الأعداد الصحيحة المتوالية نفسها ، واحد مع اثنين مع ثلاثة . يمكن أن نجرب التوقف عند عدد آخر ، وليكن خمسة . واحد مع اثنين مع ثلاثة مع أربعة مع خمسة ، ربّع مجموعها تجد مجموع مكعبات الأعداد من واحد إلى خمسة . موافق؟ إن هذا الواقع ، الذي أخبرتك خبره الآن ، قد لا يكون معروفاً لديك قبل الآن . وقد تقول أين كان ، ما هذا ، من أين أتى ، ما نوع الحقيقة المخبوءة فيه؟ إنه يفاجئك . وعندما تكتشف هذه الأشياء تشعر أنها كانت صحيحة قبل أن تجدها . وهكذا تحصل على فكرة أنها كانت موجودة بشكل ما في مكان ما ، لكن لا مكان لأمثال هذا الشيء . إن ذلك مجرد إحساس . وهذا من طباع البشر ، إننا نكافح نفسانياً كي نفهم . نعثر على كل هذه الأشياء الرائعة ، توابع بيسيل Bessel وعلاقاتها الداخلية ، وتحويلات فورييه Fourrier ، مثلاً ؛ إن لها وجوداً حقيقياً ونحن نفاجأ بها .

هذا ولدينا في الفيزياء قلق مضاعَف . فنحن نفاجأ بهذه العلاقات الرياضية الداخلية . لكنها تنطبق على العالم ، مما يسبب لنا ، بخصوص مكان وجودها ، حيرة مزدوجة . ففي حالة الرياضيات هناك شك ضئيل أن توابع بيسيل وأمثالها لا توجد في أي مكان ، علينا أن نكتشفها ، لكن هذه العلاقات كانت موجودة ، بمعنى ما ، قبل أن نكتشفها . وفي حالة الفيزياء ، وبما أن قوانينها تُطبق على العالم المادي وتعمل ، يصبح من الأصعب أن نقول أين هي . لكنها قد تكون أقرب إلى الحقيقة من قوانين الرياضيات . إنها مسائل فلسفية ولا أعرف أجوبة لها . ويستطيع المرء أن يمارس الفيزياء دون أن يجيب عنها . لكن في التفكير فيها تسلية ممتعة .

**لقد اعتاد الناس ، في وقت ما ، الاعتقاد بأن الله فصَّل العالم . ويبدو الآن أن قوانين الفيزياء تقوم بهذه المهمة تقريباً ـــ أي أنها شاملة المقدرة والمعرفة .**

بالعكس . كان الناس يفسرون الأسرار بمشيئة الله . كان كل ما لم يفهموه من صنع الله . والآن صار كل اكتشاف جديد لتفسير شيء جديد قانوناً يُستخرج من قدرات الله ويُستلهم وحده . لكنك ما زلت بحاجة إليه من أجل الأسرار الأخرى . فهو وحده القادر على خلق العالم لأننا لم نفهم ذلك بعد ؛ ولا بدّ من اللجوء إلى الله القدير لفهم تلك الأشياء التي نرى أن القوانين لا تفسرها ، كمسألة الوعي وسبب محدودية العمر ـــ الحياة والموت ـــ وما إلى ذلك . فقدرة الله كامنة في كل ما لم نفهمه . وعلى هذا أعتقد أن قدرة الله يمكن اعتبارها خبيئة في القوانين التي لم نستخرجها من قدراته بعد .

**لكنها تبدو كلها قديرة فعلاً وتهيمن على العالم المادي.**

كلا، إن العالم الفيزيائي يخضع لها. لا أدري ما تقصد بكلمة تهيمن.

**حسناً، إذا كان حقاً ما تقوله، من أن مجيء العالم الفيزيائي إلى الوجود يمكن تعليله بوساطة القوانين، فلابدّ أن القوانين كانت موجودة، بمعنى ما، قبل أن يبدأ العالم كينونته.**

لكننا لم نحصل بعد على تلك القوانين. هل تقصد تلك الحالة الافتراضية التي تشرح فيها القوانينُ كيفية انطلاق الأشياء؟

**نعم.**

حسناً، سوف أُناقش معك فلسفة العلاقات الداخلية عندما ننجح في الحصول على تلك القوانين. لا أستطيع الإجابة بدونها.

**لكن هل تعتقد بوجود قوانين من هذا القبيل؟**

ليس لدي فكرة.

**حسناً، هل تعتقد أن أعمالنا تسير باتجاه مجموعة قوانين موجودة خارج هذا النطاق وأن نظرياتنا الحالية ليست سوى صور تقريبية عنها؟**

طبعاً، وبالتأكيد. لدي شعور بأنني بصدد اكتشاف قوانين موجودة **في الخارج**، على غرار ما يشعر به الرياضي عندما يكتشف قوانين يرى أنها كانت **في الخارج**. لكنه يعلم أن قوانينه ليس لها مكان. إنني أعلم أن قوانيني مفيدة للتنبؤ بسلوك العالم لكنني، أنا أيضاً، لا أعلم علم اليقين أين مكانها. إنه سؤال لست مضطراً للإجابة عنه، لأنني أستطيع ممارسة الفيزياء دون أن أجيب عنه وبالنجاح نفسه. وهذا لا يعني أنني لا أتفكر فيه. ثق أنني **فعلت**: لقد اعتمدت على التشابهات. إنني أجد ذلك ممتعاً ومبهجاً ومسلياً، لكنه غير مهم جداً.

# 10

## ستيفن واينبرغ

ستيفن واينبرغ Stephen Weinberg أستاذ في قسم الفيزياء بجامعة تكساس، في أُستن. تناولت أعماله فيزياء الجسيمات ونظرية الحقل الكمومية والثقالة وعلم الكون، وله إسهامات مهمة في كل منها. نال جائزة نوبل على عمله في توحيد القوة الضعيفة مع القوة الكهرطيسية. إنه من الأنصار البلغاء المتحمسين للأوتار الفائقة، وهو اليوم منصرف إليها بكل نشاط.

**كان الاعتقاد الشائع، قبل حوالي مئة عام، أن الفيزياء مشرفة على نهايتها، أي أن بوادر نظرية مكتملة بخصوص العالَم كانت تلوح في الأفق. لكن الدروس التي لقنتنا إياها ما يمكن تسميته بالفيزياء الجديدة تثبت أن النهاية ما تزال بعيدة. ومع ذلك يبدو أن بعضهم يشعر مرة أخرى أننا قد نكون اليوم قريبين مما يسمونه نظرية كل شيء. هل تعتقد أن هذا أمل زائف آخر، أم أن هناك بالفعل فرصة لبلوغ مرحلة سنكون فيها قادرين على صوغ نظرية مفردة أو مبدأ يحكم كل ما يحدث في الطبيعة؟**

أعتقد أننا، نحن الفيزيائيين، تعلمنا أن نكون متواضعين جداً. إننا نهدف إلى بلوغ رؤية موحدة للطبيعة نستنتج بفضلها، على الأقل بشكل مبدئي ولو تقريبي، كل شيء من بضعة قوانين بسيطة أساسية (رغم أن ذلك لن يساعدنا حقاً في فهم الأشجار والبشر). لكننا نعلم مبلغ الصعوبات. نعلم أن من الصعب جداً، مثلاً، أن نضع في صورة واحدة الثقالة مع قوى تختلف كثيراً عنها، القوتين النوويتين والقوة الكهرطيسية. ولئن كان قد حصل تقدم عظيم، في العقد الزمني الأخير أو نحوه، في صنع صورة تتوحد فيها القوى الفاعلة في الجسيمات العنصرية، ضمن مدى طاقي يمكن بلوغه وباستثناء الثقالة، إلا أن من الصعب جداً القيام بالخطوة الأخيرة وإدخال الثقالة في تلك الصورة.

**هل لك أن تذكر لنا بعضاً من آخر الأفكار في مسألة إدخال الثقالة في الصورة؟**

لو كنت قد طرحت علي هذا السؤال قبل بضع سنوات لكنت أجبتك : لا توجد أية فكرة . أما الآن فلدينا فكرة نشأت منذ عام ١٩٧٤ ، على ما أظن ، واسمها النظرية الوترية ، وتسمى نسختها الأخيرة باسم الوترية الفائقة . لقد اختُرعت في الأصل ، عام ١٩٦٨ ، كمحاولة لفهم القوى النووية الشديدة ، القوى التي تعمل ضمن النواة الذرية لتضمن تماسكها . ثم تبين فشلها الذريع في تأدية هذه المهمة . كان من أحد عيوبها أنها تنبأت بجسيمات من نوع عديم الكتلة لا يتفق مع أي شيء مما نعرفه عن بنية النواة . وفي عام ١٩٧٤ قال جون شوارتز وجوئيل شيرك بأن هذه النظريات يجب إعادة النظر فيها ، لا على أساس أنها نظرية في القوة النووية بل نظرية توحِّد القوى كلها ، بما فيها الثقالة ، وبأن الجسيمات العديمة الكتلة التي تظهر بشكل مربك في هذه النظريات ، عندما نتخذها كنظريات في القوة النووية ، يجب أن تقبل على أنها كموم الإشعاع الثقالي المعروفة باسم غرافيتونات .

## كيف تطورت هذه النظريات فيما بعد ؟

في السنوات التي تلت عام ١٩٧٤ لم تُصِب هذه النظريات إلا اهتماماً ضئيلاً جداً . وأستطيع أن أقول إنني شخصياً لم أُعرها أي اهتمام . لقد كان لدينا ، نحن الفيزيائيين الجسيميين ، عمل ضخم ممتع في تطوير ما هو اليوم الصورة الشائعة لفيزياء الجسيمات العنصرية ، الصورة الموحدة للتفاعلين ، الضعيف والكهرطيسي ــ والقوى إن شاء الله ــ التي أصابت نجاحاً كبيراً وتأكدت جيداً جداً في سلسلة من التجارب اللامعة . وكنا نميل إلى إرجاء الثقالة إلى المستقبل البعيد لأننا لم نكن نرى أملاً في إدخالها في الصورة . أما أولئك الذين أسهموا منذ البدء في تطوير ما يسمى النظريات الوترية فقد واصلوا العمل فيها في جو من تجاهل بقية النظريين لهم . وفي السنوات القليلة الماضية فقط عادت أعمالهم لتكتسب انتباهاً عاماً في أوساط الفيزيائيين الجسيميين ، انتباهاً يعود بعض سببه إلى فشل جهودنا في كل الطرائق الأخرى ، ويعود بعضه الآخر إلى بعض التطورات الرياضية المدهشة .

لقد تبين أن هذه النظريات متماسكة رياضياً بما لم يخطر ببال أحد . زد على ذلك أن التماسك لا يبدو قائماً إلا في صنف محدود جداً من هذه النظريات ، مما يمنح هذا الصنف ميزة كان الفيزيائيون يبحثون عنها ــ الصرامة .

إن النظريات الوترية صارمة جداً . ليس فيها ما يتيح لك أن تتلاعب كما تهوى ، بخلاف ما كانت عليه الحال في معظم أنواع النظريات الأخرى التي شغلت تفكيرنا في العقد الأخير من السنين . ربما كان فيها لعبة واحدة ، أو عدد صغير من الألعاب ، ونحن نعتقد أن ممارسة هذه الألعاب يمكن أن تقود إلى تقدم حقيقي .

**إن هذه الأوتار تسكن اليوم في عالم ذي عشرة أبعاد، في النسخة النظرية المفصلة، هل هذا صحيح؟**

نعم، بعض الشيء. وكان هذا أحد الأسباب الرئيسية التي حالت دون تبني النظرية الوترية فوراً. إنها جميلة جداً على صعيد الرياضيات، كل شيء فيها متناسق بشكل رائع، لكن فقط بشرط أن تصاغ أولاً في ستة وعشرين بعداً ثم أن يُجرى عليها تعديلات لاحقة تجعلها تبدو أكثر واقعية في عشرة أبعاد، أي تسعة مكانية وواحد زمني. صحيح أن ذلك لم يُلحظ بعد. ومن كل الأعداد التي قيست تجريبياً نولي أكبر ثقة لعدد هو أهمها طبعاً، العدد أربعة الذي هو عدد أبعاد الزمكان. وعندما طُرحت هذه الأفكار للمناقشة، في أول أمرها عام ١٩٧٤، لم تجذب سوى انتباه نفرٍ قليل، لأنها بدت على الفور شيئاً مرفوضاً. لم نكن نتخيل أن نرضى بنظرية ثقالية في عشرة أبعاد. كنا نريد نظرية في أربعة أبعاد زمكانية. لكن أحد الأشياء التي طرأت في العقد السنوي الأخير هو أن الفيزيائيين اكتشفوا ثانية الفكرة القديمة التي تعود إلى تيودور كالوزا عام ١٩٢١، والقائلة بأننا ربما نعيش حقاً في عالم ذي أكثر من أربعة أبعاد كلها، باستثناء الأربعة الزمكانية، أصبحت ملتفة على نفسها بشدة في دائرة صغيرة لدرجة لا نلحظها. كان كالوزا أول من أدخل هذه الفكرة، التي لقيت بعض التشجيع من أينشتاين، كي يحاول شرح القوى الأخرى الطبيعية، كالكهرطيسية، على أساس قوة ثقالية بحتة تعمل في زمكان أكثر أبعاداً. ولهذا السبب أيضاً انبعثت الفكرة في أوائل الثمانينيات وكانت موضع جهد نشيط اضطلع به الفيزيائيون النظريون في السنوات القليلة الماضية. أعتقد أن انبعاث أفكار كالوزا وكلاين وسواهما القديمة هي التي مهدت الطريق وأزالت شكوكنا حول النظريات الوترية مصوغة في عشرة أبعاد.

هذا ورغم أن النظرية في أساسها ذات عشرة أبعاد، فإن في صورتها ستة أبعاد خفية عن أنظارنا فيما يسمى «تقوقعاً تلقائياً». وفي النظرية مفعولات دينامية تسبب للأبعاد الإضافية التفافاً ناجزاً شديداً لدرجة أننا لا نلحظ وجودها. وهكذا أصبحنا سعداء بفرضية أنه يوجد فقط ثلاثة مكانية وواحد زمني. لكن من الممكن جداً أن يكون العالم قد مر في بدء وجوده بمرحلة كانت فيها تلك الأبعاد منشورة مرئية لأي فيزيائي، لو قُدِّر له أن يوجد في ذلك الحين، إضافة إلى البعد الزمني والثلاثة المكانية.

**كيف يتيسر للوتر أن يظهر لنا في الطاقات المنخفضة على شكل جسيم؟ فمن المظنون أن الجسيمات كائنات من نوع آخر تماماً.**

إن الوتر (تصور، مثلاً، وتراً مغلقاً) يمكن أن يوجد في عدد لانهائي من أساليب الاهتزاز. وكل

حالة اهتزازية تظهر كنوع جسيمي مفرد. ولدى الصعود نحو الأعلى في سلم الأساليب الاهتزازية نجد عدداً متزايداً من الأطوال الموجية تسكن في محيط حلقة الوتر، فتكون أمام جسيمات ذات كتل متزايدة. هذا وإن الأساليب الأخفض ـ الجسيمات التي كتلها صغيرة جداً ـ هي التي نراها في مخابرنا، أي الجسيمات العادية. أما الأخريات ـ الأساليب الأعلى ـ فهي التي لن نستطيع على الأرجح مشاهدتها في المستقبل المنظور.

**هل يصح أن نعتبر الأوتار في الطاقات المنخفضة متحركة كجسم صلب فتظهر بالتالي وكأنها جسيم، لكن الوتر يبدأ بالتلوي لدى ازدياد الطاقة ويتصرف بالتالي بشكل آخر؟**

نعم، بتقريب رديء جداً. إنه وصف تقريبي. إن التصادم الذي نعرفه بين جسيمين يقابل أساليب الاهتزاز المنخفضة في الوتر، ونحسب القوى التي تنشأ بوساطة تبادل غرافيتونات، ويمكن أن نحصل على نتيجة تفيد بأن هذه القوى لا نهائية، لأن هذا ما كنا نجده دوماً عندما نحاول التعامل مع الثقالة على الصعيد الكمومي. لكن الجسيمات التي نتعامل معها في المختبر، برغم أنها تقابل أساليب اهتزاز الوتر المنخفضة، يتم تبادلها بكل الأساليب عندما يحصل هذا التبادل في أثناء نشوء القوى؛ ولدى جمع عدد لانهائي من الأساليب نحصل على نتيجة منتهية، محدودة، وهذا رائع تماماً ـ يشبه المعجزة ـ لكنه يبقى معقولاً على الصعيد الرياضي.

**كيف يجب على المرء أن يفكر بالأوتار الفائقة من خلال الفرق بين إلكترون ونترينو، لأننا في حال الإلكترون أمام جسيم مشحون، وفي حال النترينو أمام جسيم غير مشحون؟ أي ما الفرق بين هذين الجسيمين في الوترية الفائقة؟**

يمكن أن نقول إنه سؤال غير مطروح. ذلك أن توصيف الجسيمات التي ألفناها، كالإلكترونات والنترينوهات والبروتونات وسواها، يظل على ما هو عليه في الطاقات التي ندرس هذه الجسيمات فيها. ومن المظنون أن يبقى هذا التوصيف كما كان في النظرية التي أصبحت معروفة في النموذج المعتمد حالياً. إن الإلكترون والنترينو في تلك النظرية عضوان مختلفان من طائفة جسيمية، وشحنة الإلكترون تعني أنه يتفاعل مباشرة مع الحقل الكهرطيسي، والنترينو لا يفعل ذلك. لكن للنترينو تفاعلات أخرى مع أعضاء من طائفة من التفاعلات ليست الكهرطيسية سوى عضو منها. إن كل ذلك يعمل بنجاح، وهو ظريف تماماً ومتناظر وجميل، باستثناء أن التناظرات التي تربط بين الإلكترون والنترينو، والقوى الكهرطيسية وسواها من القوى، مكسورة كلها.

كل هذا عتاد قديم، ولا يبدو أنه سيتغير مع مجيء النظرية الوترية الفائقة. لكن السؤال هو: هل تستطيع الوترية الفائقة أن تتجلى، في تقريب الطاقة المنخفضة، على شكل النموذج

المعتمد حالياً؟ إن الأوتار في هذا التقريب تتجلى كجسيمات نقطية. إنها، بسبب علاقتها بأساليب الاهتزاز، إلكترونات أو نترينوهات أو جسيم آخر، ونحن نحاول معرفة ما إذا كان النموذج المعهود، بكل جسيماته (بما فيها الإلكترون والنترينو)، يخرج من النظرية الوترية الفائقة. تلك هي المسألة الرئيسية.

وهناك أسئلة تفصيلية أخرى (على غرار: لماذا يحمل الإلكترون شحنة ليس للنترينو مثلها) تجد جواباً بالطريقة ذاتها المعروفة في النموذج الحالي، لأن النظرية الوترية الفائقة لا تهدف إلى إزاحة هذا النموذج، بل إلى استخراجه من تقريب الطاقة المنخفضة بكل نتائجه مترابطة معاً.

لكن النظريين، لسوء الحظ، لم ينجحوا بعد في استخراج النموذج المعهود كحالة حدية في الطاقات المنخفضة تبلغها النظرية الوترية الفائقة. إنهم يقتربون من الهدف تقدماً وتراجعاً؛ وللنظريات الوترية الفائقة بالطبع مزايا في حدودها الطاقية الدنيا تبدو أشبه ما يكون بالنموذج المعهود، لكن لم ينجح أحد حتى الآن في إخراجه بشكل صحيح مضبوط.

إنني أجد سؤالك في غير محله. إنه يشبه السؤال التالي: «كيف تستطيع، في النسبية العامة، أن تحدد شكل جسر معلق؟». إننا نحدد شكل الجسر المعلق باستخدام الثقالة النيوتنية. ومن المزايا الظريفة في النسبية العامة مزية أنها تحوي الثقالة النيوتنية كنسخة تقريبية صالحة في سلم المسافات المعهودة عند سطح الأرض. وعلى هذا ليس عليّ أن أعيد النظر في شكل الجسر المعلق بعد اكتشاف النسبية العامة، كما أنني غير مضطر لإعادة النظر في كل النجاحات التي أحرزها النموذج المعهود بعد نشوء النظرية الوترية الفائقة.

**هل للأوتار الفائقة شحنة موزعة على طولها كله، أم موضعية؟**

يمكن أن يبرز ذلك بطرق مختلفة. كان يمكن الإجابة عن هذا السؤال في الأصل بأن الشحنة الكهربائية لا يمكن أن تنشأ إلا في نظرية الوتر المفتوح وأنها، كسواها من الخصائص ذات الصلة بالتفاعلات الضعيفة وكذلك بالتفاعلات الكهرطيسية، لصاقات معلقة بطرفي الوتر. يمكنك أن تفكر بالوتر وكأنه يحمل هذه الكميات في طرفيه.

كانت تلك الصورة الأصلية. ويوجد اليوم صور أكثر تعقيداً بكثير تنطوي على شحنات ذات صلة أيضاً بطريقة اختزال الأبعاد العشرة إلى أربعة.

**سؤال آخر ذو علاقة بهذا الموضوع. كيف يتم الحصول على هذا العديد من الأنواع الجسيمية المختلفة ــ الكواركات والإلكترونات والنترينوهات وسواها؟**

إن الأوتار تهتز في كل الأبعاد الإضافية وهذا يقود إلى عدد لا بأس به من الأساليب المختلفة. إن تلك الأبعاد الإضافية (أو المتحولات الفيزيائية الإضافية الأخرى) هي التي تعطي الأساليب المختلفة العديدة. وهذا في الواقع أحد الأشياء المشجعة في النظرية الوترية. فبسببه يصبح من الطبيعي وجود عدة أجيال جسيمية، وليس فقط الجيل الأخفض بكواركاته الخفيفة وإلكتروناته، بل أيضاً الجيل الثاني الذي يضم الكواركات الغريبة والميونات وهلم جراً. والواقع أن معظم هذه النماذج ذات أجيال عديدة جداً؛ وفي إحدى أقدم النشرات، حول محاولة الحصول على نظرية نوعية منخفضة الطاقة من النظرية الوترية، يوجد ما يقارب مئة جيل. وهذا ناجم في الحقيقة عن أن الوتر يمكن أن يهتز في تلك الأبعاد الأخرى.

**هل أفهم أن كل الجسيمات التي شوهدت لا تقابل إلا أخفض التواترات الاهتزازية؟**

نعم. إنها أخفض الأساليب. أما الأسلوب التالي فسيكون مع الأسف أثقل من أن تتاح مشاهدته. يوجد عدد محترم من تلك الأساليب الأخفض وتقابل كلُّها جسيماتٍ هي، في سلم طاقات النظرية الوترية، عديمة الكتلة.

إن سلم الكتل الطبيعي في النظرية الوترية هو في حدود $10^{19}$ جاف، وكل الجسيمات التي نتكلم عنها هي في جوهرها أساليب الوتر ذات الكتلة المعدومة.

**لكن الاهتزازات ضمن الأبعاد الإضافية لا تستدعي كتلة بلانك؟**

صحيح. هناك عدد لانهائي يستدعيها، وعدد محدود لكنه كبير نسبياً لا يستدعيها، وهذه الأخيرة هي التي نراها كجسيمات عديمة الكتلة. إنها، في الواقع، ليست عديمة الكتلة تماماً، بسبب وجود مفعولات أعمق غوراً يمكن أن تعطيها كتلة صغيرة، لكنها تظل كتلة مهملة جداً في سلم بلانك، $10^{19}$ جاف. قد لا يوجد سوى بضع مئات من تلك الجسيمات الخفيفة، في حين يوجد عدد لانهائي من الجسيمات التي تتمتع بكتل عالية تتزايد وتتزايد.

**يقول بعضهم إن المسألة يجب أن تُبحث في حدود *496* نوعاً مختلفاً من الشحنات.**

إنها نظرية غرين ــ شوارتز المشهورة التي هي الآن وإلى حدٍ ما، نظرية قديمة الطراز، وذات وتر مفتوح ذي طرفين حرين، والشحنات محمولة عند الطرفين، وعدد طرائق تراكبها يصل إلى 496. وينتج أن هذا العدد هو الوحيد الممكن الذي يُتوقع منه أن يقود إلى نظرية متماسكة كمومياً تُصنع وفق هذه التوجهات.

لكن الذي حدث منذ ظهور عمل غرين وشوارتز هو أن عدداً من الطرق في بناء نظريات

مُرضية قد اكتُشفت وتقود إلى أعداد أخرى من الشحنات. قد لا يكون هذا العدد مساوياً 496، لكننا نعتقد أن هناك عدداً محترماً، غير لانهائي، من قيم شحنات مختلفة.

## كيف يجب على المرء أن يفكر بخصوص كنه هذه الشحنات؟

علينا أن نتوقع، كما يطيب لصديقي عبد السلام أن يقول، أن تكون الطبيعة بسيطة في مبادئها، لكنها ليست بالضرورة بسيطة في بناها. إن النظرية الوترية تنطلق من مجموعة افتراضات بالغة البساطة بخصوص طريقة **كون** العالم. ثم إن هناك رياضيات معقدة قليلاً تقود إلى صورة معقدة بعض الشيء لما نتوقع مشاهدته تجريبياً في طاقات يستطيع البشر بلوغها. وأعتقد أننا يجب أن لا نخاف من كون العالم معقداً ولا من أن النظرية الوترية تتنبأ بأنه معقد. فليس المهم درجة تعقيد النتيجة الخارجة، بل درجة تعقيد الأسس الداخلية. إن الأسس الداخلية، أي الافتراضات الأساسية، بسيطة جداً؛ وهذا، في رأيي، أقدر من أي شيء آخر على جعل النظرية جذابة وجميلة. إن المرء لا يطبخ حساءً معقداً بأن يلقي فيه مكوناته تباعاً ويذوقه في كل مرة ليعلم إذا أصبح طعمه مستساغاً. إن الوصفة معينة منذ البداية وهي بسيطة جداً، رغم أن الطبيخ النهائي يصبح كثير التعقيد. إن العدد 496، مثلاً، قد ينبئ عن بنية معقدة بعوامل كثيرة، لكنها الإمكانية الوحيدة في إطار عمل غرين وشوارتز، وهي تخرج آلياً من افتراضات بسيطة جداً. وأنا ميال إلى تفضيل الافتراضات البسيطة على النتائج البسيطة.

## هل يمكن للنظرية الوترية الفائقة أن تقول شيئاً معيناً عن تفكك البروتون؟

نعم. الواقع أن بعض النظريات الوترية الفائقة في حدود الطاقة المنخفضة وقعت في حرج حين أعطت لتفكك البروتون معدلاً عالياً لدرجة مقلقة. وهذا أحد الأشياء التي تشكل عاملاً مهماً جداً في الشكوك التي تحوم حول نجاح النظرية الوترية الفائقة. فتنبؤها بأن مدة حياة البروتون من رتبة مدة حياة البيون يجعل نتائجها جديرة بسلة المهملات. وسيظل تفكك البروتون محكاً مهماً جداً لدى كل من يسعى لصنع نسخة وترية فائقة خاصة وتتعلق بالطاقة المنخفضة، لكنني لا أعتقد بوجود أي شيء يمكن أن يُعدَّ أصلاً تُستنبت منه النظرية الوترية الفائقة **بكل** ما فيها. لا أعتقد أن بالإمكان القول بأن النظرية الوترية الفائقة تجعل تفكك البروتون شيئاً لا محيد عنه أو تجعله مستحيلاً أو تجعله أسرع من اللازم أو أبطأ. إن هذا من التفاصيل التي سوف تخرج من حل خاص.

**لقد برهن غرين وشوارتز، في وقت مبكر من عمر النظرية الوترية، على أنها نظيفة من الشذوذات. فهل يصح القول بأن التخلص من الشذوذات كان آنئذ وسيلة لانتخاب نظرية**

**ذات عشرة أبعاد أو ستة وعشرين ؟**

نعم ، هذا صحيح . إن المرء يدرس عدداً من الإمكانيات ، لكننا غير واثقين مما إذا كانت هذه الإمكانيات نظريات مختلفة أم حلولاً مختلفة لنظرية واحدة . فإذا كانت حلولاً مختلفة لنظرية واحدة فنحن لا نعلم حتى الآن المبادئ الفيزيائية التي تحدد الحل الذي ينطبق على العالم الذي نراه . بيد أن من المؤكد أن هناك إمكانيات عامة معروفة الآن تفوق في عددها ما كان معروفاً أيام عمل غرين وشوارتز ، غير أننا لسنا واثقين حقاً من مدى عموميتها ، وربما تبين أنها تُختصر كلها في شيء واحد .

ليس من الخير في شيء أن نصدر مقولات بخصوص المعنى النهائي لنظرية وترية ، لأننا اليوم بالذات لا نملك وسيلة موثوقة لتمييز الحلول الحقيقية ، من بين ذلك العديد من أنواع الحلول المختلفة ، عما هو نظريات مستقلة .

**هل نستطيع توضيح قضية الشحنات التي عددها 496 ؟ ما نوع هذه الشحنات ؟**

إنها ، في الصورة التي رسمها غرين وشوارتز ، من صنع أيديهما . وليس لها علاقة بالأبعاد الإضافية . إنها مجرد حمولات في طرفي الوتر المفتوح . وهذا العدد ضروري لموازنة مفعولات أخرى من شأنها أن تُفرز شذوذات وأن تُدمر بالتالي تماسك النظرية . لكنها شحنات وُضعت باليد . وما عليك سوى أن تقول : « لتمنح النظرية هذا العدد من درجات الحرية » . لكنني عندما أقول إنها وُضعت باليد أعني أنك تضع في اعتبارك عدداً من الأوتار تحمل كل هذه الشحنات المختلفة ؛ لكنك تجد عندئذ ، وبشكل تلقائي ، أن القوى الفاعلة في تلك الشحنات ــ القوة الكهرطيسية والقوة الضعيفة وكل القوى الأخرى النابعة من هذه الشحنات والفاعلة فيها ــ تبرز كلها آلياً . لكن الشحنات نفسها وضعت ، نوعاً ما ، بما يناسب مقتضى الحال من ضرورة تأمين شروط التماسك الرياضي .

**يبدو أن الصورة تغيرت الآن قليلاً لأن الناس بدؤوا يكتشفون طرائق لصياغة النظرية . حتى إن بعض الناس اقترحوا مؤخراً طريقة لصياغتها في أربعة أبعاد .**

نعم . وإليك تصحيحاً لملاحظاتي الشخصية ينحو هذا المنحى بالذات . لقد تحدثتُ عن الأبعاد الستة المتقوقعة على نفسها ، لكن هذه ليست بالضرورة الطريقة الواجب تصورها اليوم . إذ يمكن أن يُفكَّر بالنظرية على أساس أنها مصوغة في أربعة أبعاد لكن مع بعض متحولات إضافية يمكن اعتبارها ، في بعض الحالات ، كإحداثيات أبعاد إضافية ، لكن ذلك ليس ضربة لازب . والواقع أنها ، في بعض الحالات ، **لا يمكن** أن تكون كذلك . عندئذ تفهم حقاً ماهية الامكانيات العامة

عندما تتخلى عن هذه الصورة الهندسية المنطوية على درجات حرية إضافية وتكتفي بتلك الاحداثيات الزمكانية القديمة الطيبة مضيفاً إليها عدداً من المتحولات الإضافية اللازمة لبناء نظرية متماسكة.

يوجد للتماسك شرط يتطلب هذه المتحولات الإضافية ويقدم، في الواقع، قائمة بلوازم طبخها؛ هذا رغم أننا لا نعرف بالضبط ماهية القواعد الواجب اتباعها لصنع الطبيخ. لكنها ليست من الأشياء التي نستطيع إضافتها بحرية حسب تقلبات أهوائنا. علينا أن نضيف درجات حرية تتجاوز أبعاد الزمكان الأربعة. وهذه الإجراءات، بشتى أنواعها، يجب أن تذعن تماماً لشروط التماسك الرياضي. ونحن لا نعرف بالضبط كيف نجد طريقة عامة لإرضاء تلك الشروط، أو كيف نبرهن، في أية حالة، على أننا عثرنا على حل مُرضٍ تماماً. لكن هذا هو اتجاه الأبحاث الجارية حالياً. فالصورة الأصلية، ذات الأبعاد الستة المنطوية على نفسها، لم تعد تُعتبر سوى حالة خاصة.

**إذا استغنينا بعد الآن عن فكرة أن المتحولات الإضافية تنبئ عن أبعاد فوقية، هل يمكن إعطاؤها تفسيراً فيزيائياً آخر؟**

لا أظن. إن النظرية النهائية ستكون كما هي الآن لأنها متماسكة رياضياً. أما التفسير الفيزيائي فسيتبين فقط عندما تُحل النظرية ونرى ما تتنبأ به في فيزياء الطاقات التي يمكن بلوغها. إنها فيزياء في ميدان لا يمكن بلوغه بالتجربة المباشرة، ولا يمكن للمبدأ الموجِّه أن يكون حدساً فيزيائياً لأننا لا نملك أي حدس في التعامل مع هذا السلم الطاقي. وعلى النظرية أن تتكيف مع التماسك الرياضي. ونحن نأمل أن يقود ذلك إلى نظرية ذات حلول تشبه عالم الواقع في طاقات يمكن بلوغها.

أنا أخشى أن لا تكون النظرة الفيزيائية الصائبة المعتمدة على الخبرة في تجارب الفيزياء ذات نفع عظيم هنا.

**إن مايك غرين يدعي أننا سوف نضطر إلى تعديل فهمنا للمكان والزمان كي نجعله متكيفاً. والنظرية الوترية مصوغة الآن على أساس تقليدي.**

قد يتبين، في اعتقادي، أن المكان والزمان ليس لهما في هذه النظريات أهمية بالغة. إن الإحداثيات المكانية والزمانية ليست سوى أربعة من أصل عدة درجات حرية يجب أن تُضم معاً لصنع نظرية متماسكة. وإنما نحن وحدنا، ككائنات بشرية، الذين نعطي لها ذلك المعنى الفيزيائي المتميز بأهميته الكبيرة عندنا. وبهذا الخصوص لا أدعي أنني أمثل معظم المنظرين الوتريين، لأن

معظمهم يحاولون العثور على نظرية وترية جميلة ذات أساس هندسي ــ على غرار المبادئ التي عثر بواسطتها أينشتاين على النسبية العامة . إنهم قد ينجحون . لكنني أظن أن هذا التشبيه قد يكون مضللاً ، وأن ما سنحصل عليه لن يكون نظرة إلى المكان والزمان جديدة جداً ، بل تجريداً للمكان والزمان . فقد يتبين أن الإحداثيات الزمكانية ليست سوى أربع من أصل عشر درجات حرية ــ أو خمس عشرة أو ست وعشرين أو ما شئت ــ لازمة لتوصيف النظرية . أما مغزاها الهندسي فسيأتي بعد استتباب الواقع ، لا كشيء يظهر في المبدأ الأساسي .

**لقد ثارت ، قبل بضع سنوات ، جلبة كبيرة لأن النظرية بدت وكأنها ستكون منتهية ، محدودة ، بما لا يقبل الشك . أما اليوم فلم يُبرهن ، كما فهمتُ ، على محدوديتها فعلاً إلا في تطبيق تقريبي يقتصر على النشر إلى عدد معين من الرتب . ولكن ألم يحدث مثل ذلك لنظرية الثقالة الفائقة القديمة ، التي زُعم أيضــاً أنها نظرية محدودة ثم تبين في النهاية أنها لم تكن كذلك ؟**

أعتقد أن هناك فرقــاً . إن الأدلة التي أظهرت أن الثقالة الفائقة محدودة كانت أدلة مستمدة من أخفض رتب التقريب فقط ، في نظرية الاضطراب . زد على ذلك أن الأدلة اتخذت شكل برهان على أن اللانهائيات التي يمكن أن تبرز لن تبرز في التقريب الأول أو الثاني من نظرية الاضطراب .

أما البراهين في النظرية الوترية فمختلفة جداً . إنها براهين « مهزوزة » غير دقيقة البتة ، وربما كانت غير مقنعة تماماً بأن النظرية لا بدّ أن تكون محدودة في كل رتب التقريب . فعندما يستنبط المرء ملامحها الحقيقية في أدنى رتبة من نظرية الاضطراب يجد أن تلك البراهين المهزوزة تعمل بنجاح حقــاً . وبتعبير آخر أقول : إن أسباب توقع المحدودية في الرتب المنخفضة من نظرية الاضطراب تقتصر في الثقالة الفائقة تحديداً على الرتب المنخفضة من نظرية الاضطراب ، في حين أن تلك الأسباب في الوترية الفائقة عامة جداً وتعززها الرتب المنخفضة من نظرية الاضطراب . وعلى هذا أرى أن الوضع هنا مختلف تماماً .

يجدر بي أن أقول إن على المرء أن يكون ، في الثقالة الفائقة ، متفائلاً إلى أقصى الحدود كي يتوقع أن تظل هذه النظرية محدودة في بضع المراتب الأولى من نظرية الاضطراب ، حيث يعلم أنها محدودة لأسباب خاصة جداً . أما في الوترية الفائقة فأعتقد أن المحدودية تكهن معقول . ويدهشني أكثر أن تكون غير محدودة .

**ما ردُّك على بعض الانتقادات التي وُجهت إلى النظرية الوترية الفائقة .**

أعتقد أن الإنسان يفعل ما يستطيع ــ هذا أول مبدأ في الفيزياء . إنك تعمل كل ما باستطاعتك

لإحراز تقدم . كان يمكن أن أبتهج لو حصل ما هو شائع من تعاون بين النظرية والتجربة الآن وبعد أن مر خمسة عشر عاماً ، حين كان النظريون يجربون أفكاراً جديدة وكان التجريبيون يختبرونها ، وحين كان التجريبيون يكتشفون ظواهر جديدة ويستجيب لهم النظريون . ولسوء الحظ كان لدينا ، في تلك الأيام ، من كثرة النجاح ما جعل ذلك الفصل يشرف على النهاية . ويمكن أن يُستأنف مع جيل المسرعات الجديد . ونحن نأمل ، عندما يشتغل المصادم الأكبر والمسرع ليب وربما حتى المسرعات القائمة مثل المصادم تيفاترون Tevatron ، أن نحظى بهذا النوع من « خذ وأعطني » . سيكون ذلك رائعاً . وبانتظار تحقق هذا الأمل لا نملك سوى أن نفعل ما نستطيع .

والشيء الآخر الذي يمكن أن نفعله هو أن نحاول زيادة مهارتنا وأن نفكر بطرائق إحراز تقدم يتجاوز ما نعرفه حتى اليوم ، وذلك بالاستفادة من المسرعات الموجودة والتسهيلات الأخرى . وانني سعيد إلى أبعد حد من أن هناك أناساً يفعلون ذلك وأتمنى لهم النجاح . ذلك أن الثمرة لم تنضج جيداً حتى الآن ، لأننا لم نحرز أي تقدم حقيقي يتجاوز النموذج المعهود .

والإمكانية التي يجب محاولتها هي أن نقفز قفزة كبيرة وأن نذهب إلى أعمق المستويات لنحاول أن نفهم ما يمكن استنتاجه من مبادئ بسيطة أنيقة جداً . وهذه خير طريقة إذا كان لديك بعض الأفكار الجيدة . والنظرية الوترية الفائقة تبدو لي فكرة رائعة جداً وجديرة بالمتابعة . وأنا لا أقصد أن على الناس جميعاً أن يعملوا في النظرية الوترية الفائقة ، ولا أن يقتصر عملهم على رصد الظواهر وفيزياء الطاقة المنخفضة . أرى أن على الناس أن يفعلوا ما يستطيعون . لكنني أعتقد فعلاً أن النظرية الوترية الفائقة تعطي لثقافة طلابنا المجازين نكهة رياضية قوية . ومن الخير أن يتعلموا كل هذه الرياضيات ، لكن ما يزعجني أن بعضهم لا يعرف ما هو البيون . والواقع أنني أُدرِّس هذا العام في أُستن مقرراً اسمه « فيزياء الجسيمات العنصرية » أنطلق فيه من اكتشاف الإلكترون على يدي تمسون عام ١٨٩٧ وأستمر عبر التجارب المضنية والنظريات التي توالت خلال تسعين عاماً لتقودنا إلى الفهم الحالي .

وعلى هذا فإنني أُشجع الناس على الغوص في هذه الظواهر وعلى محاولة إدراك أسسها النظرية ، إلا أنني أجد أن من الخير أيضاً أن نحاول التطلع إلى الأمام ، وأن نقفز بالطاقة فوق سبع عشرة مرتبة عَشرية لندرس ما يحدث في سلم بلانك حيث يمكن أن نعثر على الجواب النهائي . أما مصير النظرية الوترية ، سواء تبين أنها فكرة جيدة أم لا ، فيتوقف على ما يخرج منها . لكن من الجنون أن لا نجربها ، لأنها جميلة جداً وواعدة جداً وقد أُحرزت حتى الآن نجاحات كيفية في توضيح أشياء لم نكن نعرف قبل اليوم كيف نوضحها ــ الأشياء التي لها علاقة بالثقالة . إنها تستحق المحاولة .

إن من الصعب جداً أن نرى ما ستسفر عنه النظريات الوترية من نتائج، أن نعرف النبوءات التي يجب على التجريبيين والفلكيين الشروع في محاولة تجريبها أو نقضها. إننا حقاً لا نعرف حتى الآن ما تتنبأ به هذه النظريات عملياً، لا على صعيد قوى جديدة ولا على صعيد الجسيمات التي ربما ما زالت موجودة منذ مراحل العالم الأولى أو التي قد نعثر عليها بمسرعاتنا. وهنالك ملامح تشير إلى أن هذه النظريات تنطوي على وجود قوى جديدة تعمل في السلم العادي لفيزياء الجسيمات العنصرية بالاضافة إلى القوى العادية: الشديدة والضعيفة والكهرطيسية. لكن تفاصيلها لم تترعرع بعد.

إن عدد العاملين في هذا الحقل، من الفيزيائيين النظريين الشباب خصوصاً، في تزايد؛ لكن العقبات الرياضية كأداء جداً ومن الممكن جداً أن يتبين ذات يوم، كما حدث مراراً في الماضي، أن هذه النظريات، برغم ما تنطوي عليه من شبه بالعالم الواقعي، ستصادف عقبات لا يمكن التغلب عليها في سبيل العثور على تفسير ينسجم مع الحقيقة الفيزيائية. لكننا سنجد بالتأكيد، في السنوات القليلة القادمة، كثيراً من المتعة في هذه الممارسة.

# شرح بعض المصطلحات

**الأثير ether** : وسط افتراضي كان يُظن أنه يملأ الفضاء كله وفيه تنتشر الأمواج الكهرطيسية . لقد قضت نظرية النسبية على هذه الفكرة .

**باريونات baryons** : هدرونات ثقيلة يتألف الواحد منها من ثلاثة كواركات .

**بوزترونات pasitrons** : الجسيمات المضادة للإلكترونات . إن البوزترون يحمل شحنة موجبة تساوي شحنة الالكترون السالبة ، وله كتلة تساوي كتلة الالكترون لكنها مصنوعة من مادة مضادة . فهما جسيمان متضادان بهذا المعنى .

**بوزونات bosons** : اسم يطلق على صنف من الجسيمات ذات سبين أصيل يساوي صفراً أو أضعافاً زوجية صحيحة من وحدة السبين الأساسية .

**تناظر فائق Supersymmetry** : تناظر هندسي تجريدي **abstract** تتوحد بموجبه البوزونات والفرميونات في توصيف مشترك . يشكل التناظر الفائق أساساً لمعظم المحاولات الحديثة الهادفة إلى صوغ نظرية ثقالية كمومية ، وهو من المقومات الجوهرية في النظرية الوترية الفائقة .

**التوبولوجيا topology** : فرع من الرياضيات يبحث في الصفات التي تشترك فيها الخطوط والمنحنيات والسطوح ، الخ . إن التوبولوجيا ذات علاقة ضعيفة بالمفهوم الشائع لعلم الهندسة (أي بالحجوم والأشكال) لكنها تصب اهتمامها على أشياء مثل عدد العقد النقطية التي يمكن أن توجد في خط ، أو عدد الثقوب في سطح .

**ثابتة بلانك Plank's constant** : كان ماكس بلانك في الأصل قد أدخل هذه الثابتة ، التي يرمز لها بـ **h** ، على أنها حاصل قسمة طاقة الفوتون على تواتره وهي عدد ثابت طبيعي . إن ثابتة بلانك ذات نفوذ في النظرية الكمومية وتظهر أيضاً (مقسومة عادة على $2\pi$) في ظروف عديدة أخرى ؛ تُتخذ ، مثلاً ، للتعبير العددي عن قيمة السبين الأصيل .

**الثقالة الفائقة supergravity** : نظرية تعالج الثقالة على أساس أنها جزء من توصيف فائق التناظر لهندسة الزمكان .

**الجسيمات W و Z** : حوامل القوة الضعيفة . تم اكتشافها عام ١٩٨٣ ، لكن وجودها كان ، خلال مدة غير طويلة ، من النبوءات المستندة إلى أسس نظرية .

**الاختزالية reductionism** : فلسفة تقول بأن كل العمليات والمنظومات الفيزيائية يمكن أن تفسر حصراً على أساس مكوّناتها العنصرية الأولى .

**الظاهراتية phenonenology** : إنها ، حرفياً ، دراسة الظواهر . تستعمل هذه الكلمة عموماً بمعنى أنها تحليل للمعطيات التجريبية يهدف إلى الحصول على قوانين عملية دون اهتمام كبير بالأساس النظري .

**غرافيتينوهات gravitinos** : جسيمات افتراضية مسؤولة جزئياً عن نقل القوى الثقالية ، وذلك **بموجب النظرية الثقالية الفائقة التناظر .**

**غرافيتونات gravitons** : جسيمات ( أو كموم ) الحقل الثقالي التي يمكن اعتبار تبادلها بين الجسيمات المادية مسؤولاً عن القوى الثقالية .

**غليونات gluons** : الجسيمات أو الكموم التي تنقل القوة الشديدة بين الكواركات .

**فرميونات fermions** : اسم يطلق على صنف من الجسيمات سبينها الأصيل يساوي عدداً فردياً من وحدة السبين الأساسية التي هي $\frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$

**فوتونات photons** : جسيمات ( أو كموم ) الضوء وكل الأمواج الكهرطيسية الأخرى . يمكن أن تُعتبر مسؤولة عن نقل القوة الكهرطيسية .

**القوة الشديدة strong force** : القوة بين هدرونين ( جسيمين نوويين وما هو بحكمهما ) . تقول النظريات الحديثة إن أصل هذه القوة كامن فيما بين الكواركات .

**القوة الضعيفة weak force** : واحدة من القوى الأساسية الأربع في الطبيعة ، تعمل بين كل الجسيمات المادية ؛ برغم أنها غالباً ماتكون مغمورة بالقوتين الأشد منها : الشديدة والكهرطيسية . إن أكثر مفعولات القوة الضعيفة شيوعاً هو نشاط النواة الاشعاعي البيتاوي .

**كواركات quarks** : المكوّنات العنصرية ( الأوّلية ) للهدرونات ( جسيمات نووية ) . تتجمع الكواركات في ثلاثيات فتشكل الباريونات ( كالبروتون مثلاً ) وبأزواج فتشكل الميزونات .

**لولبية chirality** : الكلمة التقنية لمنظومة ، أو لجسم ، يملك يدوية معينة : يسارية أو يمينية .

**لبتونات leptons** : الاسم الجماعي المعطى لجسيمات مادية ( خفيفة عموماً ) تستجيب للقوة الضعيفة النووية ، لا للشديدة .

**مخططات فاينمان Feynman diagrams** : تقنية لدراسة التفاعلات الجسيمية بمساعدة رسوم تخطيطية. ومع أن هذه الرسوم موحية فيزيائياً إلا أنها تخطيطية وتمثل حدوداً في سلسلة حسابات أكثر مما تمثل عمليات حقيقية.

**مماثلة parity** : اسم يطلق على خصائص الخيال المرآتي لجسيم أصغر من الذرة.

**ميزونات mesons** : جسيمات ذات كتل متوسطة، تتألف من كوارك مرتبط بكوارك مضاد.

**ميونات muons** : أعضاء من صنف من الجسيمات اسمها لبتونات. تكاد تكون من جنس الالكترونات لولا أنها أثقل وقلقة أكثر.

**نترينوهات neutrinos** : لبتونات عديمة الشحنة الكهربائية وربما عديمة الكتلة. إن تفاعلها مع سواها من الجسيمات واهٍ لدرجة أنها يكاد يستحيل كشفها.

**نظريات التوحيد الكبير (ن ت ك GUTS) Grand Unified Theories** : نظريات تسعى إلى رسم صورة تتوحد فيها ثلاثة من القوى الطبيعية الأساسية الأربع: الضعيفة والكهرطيسية والشديدة.

**النظرية الذرية** : نظرية يعود أصلها إلى الفيلسوفين الإغريقيين: ديمقريطس ولوسيبوس في القرن الخامس قبل الميلاد، وتقول بأن المادة كلها تتألف من جسيمات مجهرية لا تفنى ولا تتجزأ.

**النظرية العيارية gauge theory** : نظرية توصف كل قوة فيها بلغة حقل يمتلك خصائص تناظرية تجريدية.

# المحتوى

## هذا الكتـاب

هل المادة مصنوعة حقاً، في أعمق أعماقها، من بضعة أجناس حُبيبيَّة، كما كان يقول بعض فلاسفة الإغريق، ونُقطيَّة الشكل، كما كان يظن، إلى عهد قريب، كل رجال العلم في هذا العصر ؟

يبدو أن هذه الفكرة قد وصلت اليوم، في أدواتها الرياضية على الأقل، إلى طريق شبه مسدود، وبدأت تظهر على مسرح الفيزياء نظرية جديدة، اسمها نظرية الأوتار الفائقة، ترى غير هذا الرأي.

وفي هذا الكتاب يستجوب ناشراه بعض مشاهير العلماء المختصين من أنصار هذه النظرية ومن خصومها، كي يشرحوا مضمونها ومواطن القوة والضعف فيها، كل ذلك بلغة تُيسر فهمها لجمهور المثقفين غير المختصين.

## صورة الغلاف

تمثيل رمزي لالتفاف بعض الأبعاد الإضافية على نفسها (الكرات)، على أرضية من الزمكان يتمثل فيها المكان بإحدى مجموعتي المستقيمات المتوازية، ويتمثل الزمان بالمجموعة الأخرى.

